



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Litoestratigrafía de la formación Pichu en la parte alta de la
cuenca del río Tambo (Moquegua - Puno, sur del Perú)**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Arnold David GARCÍA ZAVALETA

ASESOR

Laili María LAU LUYO

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

García, A. (2018). *Litoestratigrafía de la formación Pichu en la parte alta de la cuenca del río Tambo (Moquegua - Puno, sur del Perú)*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día miércoles 14 de marzo del año 2018, siendo las 17:00 horas, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

Dr. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
Mg. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN
Ing. JAVIER PABLO JACAY HUARACHE

(Presidente de Jurado)
(Miembro de Jurado)
(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis del Bach. ARNOLD DAVID GARCÍA ZAVALETA, quien sustentará la Tesis titulada: «LITOESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN PICHU EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO (MOQUEGUA-PUNO, SUR DEL PERÚ)», para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la colación respectiva, plantearon al graduado las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

APROBADO POR UNANIMIDAD CON LA NOTA DE 17 (diecisiete).

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. ARNOLD DAVID GARCÍA ZAVALETA.

Siendo las 17:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 14 de marzo del 2018

Dr. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
PRESIDENTE DE JURADO

Mg. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN
MIEMBRO DE JURADO

Ing. JAVIER PABLO JACAY HUARACHE
MIEMBRO DE JURADO

Dra. LAILI MARIA LAU LUYO
ASESOR

*A mi padre Huber,
por ser un ejemplo de responsabilidad
y constancia, cualidades
que me ha inculcado siempre.*

*A mi madre Monica,
por su apoyo y guía en todo momento,
por sus consejos, y sobre todo por su infinito cariño
y amor en cada instante de mi vida.*

*A mis abuelos,
por sus consejos, por los valores inculcados
y por el cariño de padres que siempre me mostraron.*

*A mi hermano Ivan,
por ser el ejemplo de un hermano mayor.*

*A mi hermanita Liz,
por su cariño y apoyo constante.*

Agradecimientos

En este apartado quiero expresar mi gratitud a las personas que influenciaron directamente en el desarrollo de este trabajo de investigación. A mis asesores externos, la Ing. Cristina Cereceda, bajo cuya supervisión y apoyo escogí este tema de investigación. Al Ing. Daniel Torres por la compañía, orientación y sugerencias en campo. A mi asesora interna Dra. Maria Lau, por su paciencia, apreciaciones y recomendaciones que permitieron culminar el manuscrito.

También me gustaría agradecerle a INGEMMET, institución que me dio la oportunidad y facilidades para realizar este trabajo de investigación. A mis compañeros del programa de Geología Marina y de Suelos, Ing. Luis Cerpa, Dr. Gery Herbozo, Jose Herrera, Oscar Annco, Katty Cordóva, Deisy Arriola, Wilson López, Dennis Guevara, Paola Chapilliquén y Vilma Maquera, quienes volvieron más placentera esta etapa.

No puedo terminar sin agradecer a mis padres, hermanos y familiares, en cuyo estímulo constante y amor he confiado a lo largo de mis años en la universidad y durante esta etapa de mi formación profesional.

Finalmente agradezco a la Universidad Nacional de Mayor de San Marcos y cada uno de mis profesores, por todas las experiencias y enseñanzas durante mi etapa universitaria.

Resumen

El presente estudio, comprende áreas ubicadas en el borde Oriental de la Cordillera Occidental del Sur del Perú, entre los departamentos de Puno y Moquegua. El relleno de las cuencas de intra-arco durante el Eoceno-Oligoceno inferior presentan diversas facies volcánicas y sedimentarias, las cuales evidencian un vulcanismo contemporáneo a la sedimentación para este lapso de tiempo; este relleno representado por la Formación Pichu se produjo en cuencas contemporáneas pero de diferente comportamiento geodinámico. Así, esta investigación se enfoca en determinar una caracterización de las rocas que componen esta unidad litoestratigráfica para diferenciarla de unidades de similar litología pero de diferente edad, lo cual ha sido tema de discusión a través del tiempo en los avances y las actualizaciones de la carta geológica; este estudio se realizó mediante el cartografiado geológico, levantamiento de columnas, análisis de facies y análisis litogeoquímico.

Las observaciones de campo y el análisis de facies muestran que la Formación Pichu está conformado por cuatro miembros (A, B, C y D), las cuales comprenden una amplia variedad de ambientes sedimentarios tales como ambientes aluviales, fluviales, lacustrinos y volcánicos. Los tres sectores de correlación (Norte, Centro y Sur) permitieron establecer los miembros de la Formación Pichu. El Miembro A representa ambientes explosivos y efusivos, y se encuentra constituida por rocas lávicas andesíticas, tobas y brechas piroclásticas; el Miembro B representa ambientes aluvio-fluviales, y está constituido por conglomerados areniscas, limolitas y niveles volcánicos explosivos; el Miembro C representa ambientes fluvio-lacustrinas, y está constituido por calizas, areniscas, limolitas y niveles volcánicos explosivos; y el Miembro D representa ambientes aluvio-fluviales, está constituido por conglomerados areniscas, limolitas y niveles volcánicos explosivos. La distribución y disposición de las facies volcánicas y sedimentarias se interpretan como el resultado de una actividad volcánica efusiva y explosiva contemporánea a la sedimentación en la cuenca. Por otro lado, la litogeoquímica evidencia que las rocas volcánicas de la Formación Pichu son geoquímicamente diferentes a las rocas volcánicas del Grupo Tacaza, lo que evidencian eventos volcánicos distintos.

Abstract

The present study, includes areas located in the Eastern edge of the Western Cordillera of Southern Peru, between the departments of Puno and Moquegua. The filling of the intra-arc basins during the Lower Eocene-Oligocene where various volcanic and sedimentary facies occur, which evidence a contemporary volcanism to sedimentation for this period of time; This filling represented by the Pichu Formation was produced in contemporary basins but with different geodynamic behavior. Thus, this research focuses on determining a characterization of the rocks that make up this lithostratigraphic unit to differentiate it from units of similar lithology but of different ages, which has been the subject of discussion over time in the advances and updates of the geological chart this study was carried out through geological mapping, column surveys, facies analysis and lithogeochemical analysis.

Field observations and facies analysis show that the Pichu Formation is composed by four members (A, B, C and D), which comprise a wide variety of sedimentary environments such as alluvial environments, fluvial, lacustrine and volcanic environments. The three correlation sectors (North, Center and South) allowed to establish the members of the Pichu Formation. Member A represents explosive and effusive environments, and is constituted by andesitic lava rocks, tuffs and pyroclastic breccias; Member B represents alluvial-fluvial environments, and is constituted by conglomerates sandstones, siltstones and explosive volcanic levels; Member C represents fluvio-lacustrine environments, and is constituted by limestones, sandstones, siltstones and explosive volcanic levels; and Member D represents alluvial-fluvial environments, is constituted by conglomerates sandstones, siltstones and explosive volcanic levels. The distribution and disposition of the volcanic and sedimentary facies are interpreted as the result of an effusive and explosive volcanic activity contemporaneous with sedimentation in the basin. On the other hand, the lithogeochemistry evidences that the volcanic rocks of the Pichu Formation are geochemically different from the volcanic rocks of the Tacaza Group, which show different volcanic events

Índice general

1	Planteamiento del problema	1
1.1	Situación problemática	1
1.2	Formulación del problema	2
1.2.1	Problema general	2
1.2.2	Problema específicos	2
1.3	Justificación	2
1.4	Objetivos de la investigación	3
1.4.1	Objetivo general	3
1.4.2	Objetivos específicos	3
2	Marco teórico	4
2.1	Antecedentes del problema	4
2.2	Bases teóricas	10
2.2.1	Ambientes sedimentarios continentales	10
2.2.1.1	Sistemas aluviales	10
2.2.1.2	Sistemas fluviales	12
2.2.1.3	Sistemas lacustres	14
2.2.1.4	Sistema volcánico-magmático	15
2.2.2	Tipos de facies	18
2.2.2.1	Facies sedimentarias	18
2.2.2.2	Facies lávicas	21
2.2.2.3	Facies piroclásticas	22
2.2.3	Geoquímica	24
2.2.3.1	Geoquímica de elementos mayores	24
2.2.3.2	Geoquímica de elementos trazas	24
2.2.3.3	Tierras raras y diagrama multielemental	25
2.3	Marco conceptual o glosario	27
3	Hipótesis y variables	29
3.1	Hipótesis	29
3.1.1	Hipótesis general	29
3.1.2	Hipótesis específica	29

3.2	Identificación de variables	29
3.2.1	Variables independientes	29
3.2.2	Variables dependientes	29
3.2.3	Variables Intervinientes	29
3.3	Operacionalización de variables	31
4	Metodología de la investigación	32
4.1	Tipo y diseño de la investigación	32
4.2	Unidad de análisis	32
4.3	Población de estudio	32
4.4	Tamaño de muestra	32
4.5	Selección de muestra	33
4.6	Técnicas de recolección de datos	33
4.7	Presupuesto	33
4.8	Cronograma de actividades	34
5	Generalidades	35
5.1	Introducción	35
5.1.1	Ubicación y accesibilidad	35
5.1.2	Geomorfología	36
5.1.3	Geología del área de estudio	36
5.1.3.1	Estratigrafía	39
5.1.3.1.1	Mesozoico	39
5.1.3.1.2	Cenozoico	43
5.1.3.2	Rocas intrusivas	49
5.1.3.2.1	Intrusivos plutónicos:	49
5.1.3.2.2	Intrusivos subvolcánicos:	49
5.1.3.3	Geología estructural	50
5.1.3.4	Geología económica	52
6	Análisis sedimentológico de la Formación Pichu	53
6.1	Miembro A	55
6.1.1	Columna Jachata	55
6.1.2	Columna Jesús María	56
6.1.3	Columna Chahuana	58
6.1.4	Columna Antajahua	60
6.1.5	Columna Catosive	62
6.1.6	Columna Coralaque	63
6.2	Miembro B	66
6.2.1	Columna Llapapata	66
6.2.2	Columna Totorani	68

6.2.3	Columna Jesús María	73
6.2.4	Columna Antajahua	76
6.2.5	Columna Catosive	77
6.3	Miembro C	80
6.3.1	Columna Catosive	80
6.3.2	Columna Ciguaya	82
6.4	Miembro D	84
6.4.1	Columna Quemillone	84
6.5	Correlación de Columnas Estratigráficas	86
6.5.1	Sector Norte	86
6.5.2	Sector Centro	87
6.5.3	Sector Sur	87
6.6	Distribución litoestratigráfica y cronoestratigrafía	90
7	Análisis Litogeoquímico	92
7.1	Litogeoquímica de las rocas Volcánicas	93
7.2	Litogeoquímica de las rocas Sedimentarias	99
8	Discusión de los resultados	103
9	Conclusiones y recomendaciones	104
9.1	Conclusiones	104
9.2	Recomendaciones	105
	Referencias bibliográficas	106

Capítulo 1

Planteamiento del problema

1.1 Situación problemática

En los Andes del Sur del Perú aflora una unidad litoestratigráfica denominada Formación Pichu, la cual fue descrita y definida por primera vez por *Marocco y Del Pino* (1966), quienes en el cuadrángulo de Ichuña la describen como una secuencia piroclástica, lávica y sedimentaria infrayacente al Grupo Tacaza; y en base a relaciones estratigráficas la Formación Pichu fue reconocida como parte del Terciario inferior.

Posteriormente, *Palacios et al.* (1993) en el cuadrángulo de Callalli describen a la Formación Pichu sobreyacente al Grupo Tacaza (datado en 22 Ma), con esto la Formación Pichu sería post Oligoceno; *Quispesivana y Zapata* (2000) en base a relaciones estratigráficas en el cuadrángulo de Omate le asigna una edad Eocena Media a Superior; mientras que *Cuellar* (2001) en el cuadrángulo de Pichacani describe a la unidad infrayaciendo a la Formación Molla, la cual pertenece al Grupo Tacaza, en base a esta relación estratigráfica le asigna una edad tentativa del Paleogeno-Eoceno inferior.

Los trabajos de actualización de la Carta Geológica Nacional redefinieron cartográficamente secuencias de la Formación Pichu como parte del Grupo Maure basándose en unas dataciones de 16.1 Ma (*Bellon y Lefèvre*, 1976), así también la Formación Pichu fue incluida dentro del Grupo Tacaza (*Lipa et al.*, 2001; *Carrasco*, 2002), este último datado en 23.5-30 Ma (*Wasteneys*, 1991); tomando en cuenta lo mencionado la Formación Pichu formaría parte del Oligoceno.

Con lo anteriormente mencionado se puede resumir que la Formación Pichu no tiene un rango de edad claramente establecido; además, las secuencias de la unidad en estudio tampoco están claramente definidas, actualmente no existe una sección estratigráfica tipo; otro problema es la similitud litológica y el traslape existente entre la Formación Pichu y el Grupo Maure, tomando en cuenta que este último está enmarcado en el Mioceno (*Flores y Rodríguez*, 1999; *Cerpa y Meza*, 2001; *Torres*, 2011). Es así que la existencia discrepante de la información geológica de esta unidad repercute directamente en la comprensión de la estratigrafía volcánica y volcánica-sedimentaria del Paleógeno-Neógeno del Sur del Perú.

1.2 Formulación del problema

Una unidad litoestratigráfica debe permitir obtener el objetivo claro de la información definida para investigaciones posteriores sobre: 1) Una definición, caracterización y descripción clara y completa de la unidad, de manera que cualquier investigador a futuro pueda identificarla; y 2) La definición de un estratotipo o la localidad tipo, donde la unidad haya sido establecida y pueda ser usada como referencia para científicos interesados (Guía Estratigráfica internacional).

Si bien es cierto, *Marocco y Del Pino* (1966) exponen una descripción bastante detallada de la litología y contactos de la unidad; algo que no se presenta en el cuadrángulo de Ichuña y que es relevante en una unidad litoestratigráfica, es un estratotipo o una localidad tipo; al tener ausente este tipo de información surge la dificultad para diferenciar a la Formación Pichu de unidades litoestratigráficas que poseen litología similar, y más aún cuando no se tienen claras las secuencias de la Formación Pichu. Este problema no se puede resolver solamente con un estudio estratigráfico y sedimentológico, es por eso que el uso de la geoquímica se hace necesario en este estudio, porque permitirán determinar las principales características de esta unidad.

1.2.1 Problema general

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado se plantea explicar el siguiente problema:

¿Cuáles son las características distintivas de la Formación Pichu?

1.2.2 Problema específicos

Para un mayor entendimiento en el estudio de la Formación se hace necesario explicar los siguientes problemas específicos:

¿Cuál es la columna estratigráfica tipo de la Formación Pichu?

¿Cuáles son las facies y el ambiente depositacional de la Formación Pichu?

¿Cuál es el rango de edad que se le asigna a la Formación Pichu?

1.3 Justificación

Actualmente no existe un estudio de facies de la Formación Pichu, además un estudio geoquímico es de gran importancia para poder caracterizar a esta unidad litoestratigráfica.

El uso de la geoquímica permitirá clasificar desde un punto de vista químico a las rocas, así también evidenciar las condiciones de formación haciendo uso de gráficos geoquímicos, y determinar patrones de elementos que evidencian la firma o impronta geoquímica de la unidad.

En análisis de facies complementado con estudios geoquímicos permitirán obtener una mejor caracterización e interpretación de la unidad en estudio.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

1. Determinar las características distintivas de la Formación Pichu y comprender su evolución volcánica y sedimentaria.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Realizar el análisis sedimentológico y estratigráfico de la secuencias volcánicas y sedimentarias de la Formación Pichu.
2. Realizar el análisis geoquímico de la Formación Pichu.
3. Definir la secuencia litoestratigráfica generalizada y estimar la edad de la Formación Pichu.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Antecedentes del problema

Marocco y Del Pino (1966) - “Geología del Cuadrángulo de Ichuña”

Describen bajo el nombre de Formación Pichu a la serie volcánico-clástica continental, de un color verde muy característico, como parte del Grupo Puno con extensión en la hoja de Ichuña y fuera de ella. La Formación está constituida por piroclásticos, lavas y sedimentos. Los piroclásticos constan esencialmente de tufos o ignimbritas, mientras que las lavas corresponden en su mayoría a andesitas y en menor proporción basaltos; y los sedimentos consisten en conglomerados, brechas, areniscas tufáceas y calizas; el presente conjunto de rocas propone una transición de facies continentales aéreas hacia facies lacustrinas.

En cuanto a las relaciones de contacto se describe casi concordantemente al conglomerado Ciguaya, con discordancia angular al Grupo Yura, encontrándose cubierta en discordancia erosional por el volcánico Tolapalca y por la Formación Quemillone; por estas relaciones estratigráficas fue considerada dentro del Terciario inferior.

Guevara (1969) - “Geología del Cuadrángulo de Characato”

En el cuadrángulo de Characato se describe que la Formación Pichu está constituida por brechas andesíticas verdes, rojizas, chocolate y gris claro, derrames andesíticos, tufos dacíticos blanquecinos, areniscas tufáceas de color marrón.

La unidad litoestratigráfica yace en discordancia angular y aparentemente concordante en otros sectores sobre el Grupo Yura, e infrayace en discordancia angular al Grupo Tacaza. Se le asigna una edad Terciaria inferior por ser la prolongación de una parte del Grupo Puno del cuadrángulo de Ichuña.

García (1978) - “Geología de los Cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz y Pizacona”

Describe que la Formación Pichu está representada por conglomerados y brechas de color verde violáceo, ambos con elementos de naturaleza mayormente volcánica, de composición andesítica

con menores proporciones de rocas intrusivas, cuarcitas y algo de calizas, intercaladas con escasas areniscas conglomerádicas de matriz tufácea, de colores predominantemente verde a crema-amarillento. La Formación Pichu es típicamente continental ofreciendo grandes variaciones laterales; su espesor en estos cuadrángulos es aproximadamente de 700 m.

Esta unidad litoestratigráfica suprayace en discordancia angular al volcánico Matalaque e infrayace con la misma relación al volcánico Tacaza; en base a estas relaciones se le asigna una edad la cual se sitúa entre el Crétaceo superior-Terciario inferior, es decir que se habría depositado entre el Eoceno-Oligoceno inferior.

Klinck et al. (1986) - “The geology of the cordillera Occidental and Altiplano west of Lake Titicaca Southern Peru”

En el cuadrángulo de Callalli, la Formación Pichu esta compuesta principalmente por riolitas a tufos riodacíticos e ignimbritas con menor cantidad de lavas andesíticas y conglomerados. Las sucesiones son bastantes variables pero dominan las ignimbritas soldadas y no soldadas, también incluye sedimentos de color gris pálido a gris verdoso y está conformado por tufitas de grano grueso a fino, conglomerados pobremente sorteados en el cual los clastos de andesita porfirítica son usuales; mencionando un espesor de aproximadamente 500 m.

La Formación Pichu reposa de manera discordante sobre el Grupo Tacaza y a su vez se encuentra cubierto en discordancia angular por el Grupo Sillapaca, el Grupo Barroso y la ignimbrita Confital; en zonas donde el Grupo Tacaza está ausente se encuentra descansando sobre secuencias Mesozoicas. La Formación Pichu es considerada como parte del Mioceno tomando en cuenta que cubre al Grupo Tacaza datado en 22 Ma y a su vez se encuentra afectada por un pórfido de cuarzo datado en 15 +/- 0.5 Ma (Roca total).

Cruz (1976) - “Geología y evaluación preliminar de las calizas del sector Curire – Chaclaya distrito de Ichuña - Moquegua”

Describe a la Formación Pichu en el sector de Curire como una serie volcanoclástica continental perteneciente al Grupo Puno. Esta unidad litoestratigráfica sobreyace de manera concordante al Conglomerado Ciguaya y de manera discordante al Grupo Yura. La serie está compuesta por tufos de color blanco rosáceo en superficie fresca, coladas de lava de composición andesítica que se intercalan con sedimentos compuestos por areniscas tufáceas de grano fino a medio, brechas y conglomerados con matriz areno-tufácea y cuyos clastos son de rocas volcánicas. El espesor promedio descrita por el autor en la zona es de 200 m.

Bajo la consideración que el Grupo Puno descansa sobre las rocas plegadas del Grupo Yura se dedujo que el Grupo Puno va del Cretáceo más reciente hasta el Terciario inferior a medio.

Medina (1998) - “Estudio Geológico – Geotécnico de Factibilidad para la Construcción de un reservorio con capacidad de 1500 m³”

Describe a la Formación Pichu en el distrito de Lloque, departamento de Moquegua; en esta zona la unidad está constituida por tufos y depósitos lacustres, además brechas de tipo andesítica.

La unidad se encuentra infrayaciendo en discordancia erosional al volcánico Llallahui, el cual es considerado parte del Grupo Tacaza, en base a esta relación la edad de la Formación Pichu es considerada entre el Terciario inferior y medio.

Quispesivana y Zapata (2000) - “Memoria descriptiva de la geología del cuadrángulo de Omate (34-u)”

Describen en el cuadrángulo de Omate unos afloramientos restringidos de la Formación Pichu con morfología abrupta a modo de farallones subverticales. La unidad está constituida por andesitas afíricas a porfiríticas gris rosadas y niveles con patina verdosa, una secuencia de aglomerados volcánicos en la parte media, la cual varía hacia el tope a brechas volcánicas con clastos subangulosos de rocas volcánicas de composición andesítica a dacítica.

La unidad sobreyace en discordancia erosiva al Grupo Puno y a la Formación Matalaque, e infrayace de igual característica a la Formación Huaylillas. Tomando en cuenta estas relaciones estratigráficas la unidad fue enmarcada entre el Eoceno medio a superior.

Así también el Volcánico Tolapalca fue correlacionado con la Formación Pichu, y a su vez la parte lacustrina de la Formación Pichu fue considerada como la parte inferior del Grupo Maure.

Cuellar (2001) - “Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de las Series Meso-Cenozoicas del Cuadrángulo de Pichacani (Hoja 33-v) Cuadrante II (SE), Sur del Perú”

Presenta una columna estratigráfica de la Formación Pichu de 700 m de espesor en la parte Sureste de la hoja de Pichacani en la cual diferencia un miembro inferior y uno superior.

El miembro inferior es una secuencia granodecreciente y consta de conglomerados de color verde con matriz tobácea con clastos en su mayoría de composición volcánica intercalado con estratos de areniscas tobáceas de color verde amarillentas, gris y rojas; le sigue unas intercalaciones de areniscas grises con niveles de calizas marrones claras, hacia el techo de este miembro se encuentran canales pequeños de conglomerados.

El miembro superior empieza con una colada volcánica de composición andesítica con fenocristales, le sigue areniscas tobáceas retrabajadas de color moradas, verdes y rojas intercaladas con estratos de lutitas moradas, rojas y verdes. El ambiente de deposición de la unidad en la base es de un ambiente fluvial que pasa a un ambiente lacustrino con la interrupción de un evento volcánico para seguir con la sedimentación lacustrina.

La Formación Pichu se encuentra en fuerte discordancia angular sobre las unidades mesozoicas del Grupo Yura, Formación Murco y Formación Acurquina; a su vez la Formación Pichu infrayace a la Formación Molla la cual es parte del Grupo Tacaza. La edad tentativa de esta unidad litoestratigráfica sería Paleógena y probablemente Eoceno inferior tomando en cuenta las relaciones estratigráficas, así como el hecho de encontrar, entre los clastos de los horizontes conglomerádicos, fragmentos de rocas cuya edad se sitúa entre el Cretáceo Superior y Terciario Inferior.

Lipa et al. (2001) - “Memoria Explicativa de la revisión del cuadrángulo de Ichuña”

Describen en la hoja de Ichuña a la Formación Pichu como la parte inferior del Grupo Tacaza. en esta zona la unidad está constituida por una alternancia de andesitas, areniscas gris verdosas,

conglomerados con clastos volcánicos y piroclastos. El espesor mencionado para esta unidad varía desde 400 m al norte de Yanahuara hasta 80 m al norte de Coalaque.

La Formación Pichu descansa en discordancia angular sobre el Grupo Yura, por esta posición estratigráfica se le asigna al Paleógeno y posiblemente Eoceno.

Carrasco (2002) - “Características Petrográficas y Geoquímicas del Grupo Barroso en los Cuadrantes III y IV del Cuadrángulo de Ichuña (33-u)”

Reconoce a la Formación Pichu al sureste del caserío de Asureme en el río Tambo. La unidad presenta un relieve abrupto y forma escarpas, pero más hacia el este presenta una morfología suave. En este trabajo se describe a la unidad como parte inferior del Grupo Tacaza.

La unidad presenta una coloración verde muy típica y litológicamente consiste en una gruesa secuencia volcanoclástica continental, constituida por areniscas verdes masivas microconglomerádicas y andesitas basálticas.

El espesor mencionado por el referido autor es de aproximadamente 400 m; las relaciones de campo indican que suprayace casi concordantemente al Grupo Puno, en discordancia angular al Grupo Yura e infrayace a la Formación Llallahui. En base a estas relaciones estratigráficas se le asigna una edad que corresponde al Mioceno, y se correlaciona en parte con el Grupo Puno de los alrededores del lago Titicaca.

Rodríguez et al. (2002) “Descripciones del Relleno Oligoceno-Mioceno entre las Cuencas Tincopalca y Huacochullo. Borde Oriental de la Cordillera Occidental entre los Departamentos de Puno y Arequipa”

En el cuadrángulo de Lagunillas, en el río Quemillone, redefinen como Formación Pichu a lo anteriormente cartografiado como conglomerado Totorani por *Palacios et al.* (1993). La secuencia consta de sedimentos conglomerádicos con clastos de naturaleza volcánica, cuarcitas y calizas, envueltos en una matriz arenosa de color verde de composición volcánica, se intercalan con bancos de areniscas y limos, y al techo se tiene la presencia de niveles de lavas volcánicas de composición andesítica.

En los alrededores de Ichuña se describe la unidad sobreyaciendo en discordancia angular al Grupo Yura. En la base predominan ampliamente rocas volcánicas, con intercalaciones de brechas, conglomerados, arenas de color verde y al techo compuesto por mayor presencia de areniscas verdes con la intercalación de un nivel tobáceo. La unidad infrayace a una espesa colada de andesita que pertenece al Grupo Tacaza.

Se le asigna a la unidad una edad entre el Eoceno y Oligoceno inferior.

Sánchez y Zapata (2003) - “Memoria descriptiva de la Revisión y Actualización de los Cuadrángulos de Sicuani (29-t), Nuñoa (29-u), Macusani (29-v), Limbani (29-x), Sandia (29-y), San Ignacio (29-z), Yauri (30-t), Azángaro (30-v), Putina (30-x), La Rinconada (30-y), Condoroma (31-t), Ocuvi (31-u), Juliaca (31-v), Callalli (32-t), y Ácora (32-x)”

Los afloramientos de la Formación Pichu y Grupo Tacaza, ubicados en los sectores norte y sur del cuadrángulo de Callalli, fueron considerados en su totalidad como parte del Grupo Tacaza; diferenciando tres miembros: miembro inferior (Ignimbritas y tobas de composición dacítica y riolítica),

miembro medio (lavas porfíricas y brechas de composición andesítica) y miembro superior (flujos de lava y tobas de composición dacítica y andesítica, intercalados con vulcanitas gris verdosas).

Además entre la localidad de Callalli y la hacienda Pulpera, se considera como Formación Palca a una secuencia piroclástica, la cual anteriormente fue denominada como Formación Pichu.

Valdivia y Rodríguez (2003) - “Memoria descriptiva de la Revisión y Actualización del Cuadrángulo de Lagunillas (32-u)”

Se reconoce al Noroeste de Santa Lucía una secuencia constituida por material volcánico-sedimentario compuesto por niveles de areniscas gris verdosas con abundante contenido de plagioclasas y algo de micas; además a lo largo del río Cerrillos y en el cerro Yahualla se reconoce una secuencia de sedimentos grises volcano-sedimentarios intercalados con brechas, flujos de debris y lavas afaníticas. Esta secuencia por encontrarse por debajo de niveles de lavas, brechas y tobas, fue definida como parte basal del Grupo Tacaza.

Por la similitud litológica fue comparada con la parte superior de la secuencia volcano-sedimentaria de la Formación Pichu descrita por Marocco y Del Pino (1966).

Valencia y Rosell (2003) - “Memoria descriptiva de la Revisión y Actualización del Cuadrángulo de Puno (32-v)”

Reconocen en el cuadrángulo de Puno al Grupo Tacaza compuesto por las Formaciones Pichu, Totorani y Carayccasa. La Formación Pichu en la zona está compuesta por areniscas tobáceas retrabajadas gris blanquecinas con niveles de brechas volcánicas en una matriz verdosa, con presencia de niveles calcáreos.

Por otro lado en la quebrada Puncupatu se encuentran secuencias de areniscas feldepáticas y cuarzosas verdosas con laminación cruzada, un nivel de ignimbritas rica en cristales y fragmentos de roca, y niveles de limoarcillitas negras con areniscas finas cuarzosas.

Las secuencias de la Formación Pichu fueron depositadas posterior a la fase Inca 3, la cual plegó a las areniscas rojizas y a las areniscas tobáceas del Grupo Puno; la Formación Pichu representa una transición entre las secuencias continentales del Grupo Puno y los niveles volcánicos del Grupo Tacaza.

Carlotto et al. (2005) - “Las Cuencas Terciarias Sinorogénicas en el Altiplano y en la Cordillera Occidental del Sur del Perú”

En la cordillera Occidental no hay evidencias sedimentarias del Eoceno inferior (50 a 42 Ma). Los depósitos posteriores se hallan en fuerte discordancia sobre el Cretácico o sobre el Jurásico y localmente sobre el Paleoceno, lo que explica una fuerte erosión en la cordillera Occidental en este periodo. Sin embargo, los conglomerados son atribuidos al Eoceno medio - Oligoceno inferior tanto por su posición estratigráfica como por su evolución sedimentaria, estos depósitos conforman a las Formaciones Pichu y Huanca.

Como consecuencia del gran evento tectónico “Inca I” del Eoceno medio, que se inicia entre 44 – 42 Ma, se crearon las cuencas del Eoceno superior - Oligoceno inferior tanto en el límite Cordillera Occidental – Altiplano y en la Cordillera Occidental. Hacia el Norte, en el Altiplano

continúa el desarrollo de la cuenca fluvial de capas rojas (Soncco) pero en posición distal de la cuenca de antepaís; durante este periodo el Batolito de Andahuaylas-Yauri (40-32 Ma) se levanta rápidamente y cuerpos subvolcánicos porfiríticos se emplazan. Los productos de la erosión asociada al levantamiento, así como del vulcanismo son depositados en las cuencas Anta y Soncco (unidades correlacionables en edad a la Formación Pichu).

Remigio (2012) - “Domos, diatremas y piroclastos del complejo Chucapaca, evidencias de sistemas epitermales — Moquegua-Perú”

En las comunidades Corire y Chucapaca, dentro del cuadrángulo de Ichuña, reconoce a la Formación Pichu como la parte superior del Grupo Tacaza (22-17 Ma). El espesor aproximado mencionado por el autor es de 500 m y está constituida por flujos de lavas de composición basáltica, traquibasáltica y traquiandesítica, con facies masivas y autobrechas, intercalada con niveles delgados y aislados de areniscas volcanoclásticas de coloración marrón rojizas de composición andesíticos-basálticos. Las facies volcánicas coherentes se presentan amigdaloides y vesiculares.

La unidad como miembro superior del Grupo Tacaza infrayace al Grupo Maure y descansa en discordancia angular sobre la Formación Hualhuani.

Carlotto (2013) - “Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of Cenozoic basins in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru”

En la cordillera Occidental, los conglomerados de la Formación Pichu y la Formación Huanca son atribuidos del Eoceno Medio al Oligoceno Temprano por las posiciones estratigráficas y evolución sedimentaria; ambas formaciones infrayacen discordantemente al Grupo Tacaza.

Esta secuencia está dominada por sedimentos derivados de fuentes ígneas; tomando en cuenta su posición estructural dentro del orógeno, estos depósitos son interpretados como cuencas de intra-arco y antepaís. La acumulación sedimentaria en tales cuencas puede estar relacionada a la subsidencia inducida por fallas y/o “ponding” dentro de áreas topográficamente cerradas con drenaje interno.

Además, el referido autor propone una correlación entre la Formación Pichu y la Formación Huanca, ambas de la cordillera Occidental; la Formación Anta y el Grupo Puno Sur, del margen Noreste de la cordillera Occidental; el Grupo San Jerónimo y el Grupo Puno, ambos del Altiplano; el Grupo Puno Norte de la cuenca Putina; y las unidades Tiahuanacu y Potoco, ambas de Bolivia.

Rodríguez et al. (2014) - “Revisión Estratigráfica del Grupo Puno (Eoceno) en el Límite del Altiplano y la Cordillera Occidental (Acora-Puno-Mañazo). División de Cuencas Sedimentarias”

Describe las secuencias del Grupo Puno en las cercanías de Acora y Chucuito, y las diferencia de las secuencias de la Formación Pichu en las cercanías de la Hacienda Cairane.

El Grupo Puno está compuesto en la base por areniscas y lutitas, hacia la parte superior de la secuencia desaparecen las lutitas y comienzan a estar presentes conglomerados los cuales se hacen más abundantes al techo hasta desaparecer las areniscas, en general la secuencia es grano y estratocreciente que representa la progradación de medios fluviales proximales sobre medios de

llanura de inundación y fluviales distales. Por otra parte la Formación Pichu está compuesta por conglomerados con clastos angulosos que pasan progresivamente a areniscas masivas; en general es una secuencia grano y estratodecreciente generada por retrogradación de abanicos aluviales proximales a abanicos aluviales distales en un ambiente volcánico.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Ambientes sedimentarios continentales

Un ambiente sedimentario está definido como una parte de la superficie de la Tierra la cual posee características físicas, químicas y biológicas, todas estas distintas de áreas adyacentes (Selley, 2000). Las clasificaciones hechas por diversos autores agrupan a los ambientes sedimentarios de manera general; así tenemos ambientes continentales, transicionales y marinos (Figura 2.1).

En esta parte del capítulo se hará énfasis en los medios ambientes continentales los cuales suelen ser bastante complejos pues sus facies varían de manera vertical y lateral en tramos relativamente cortos; a su vez estos ambientes sedimentarios están relacionados con la actividad tectónica y el vulcanismo.

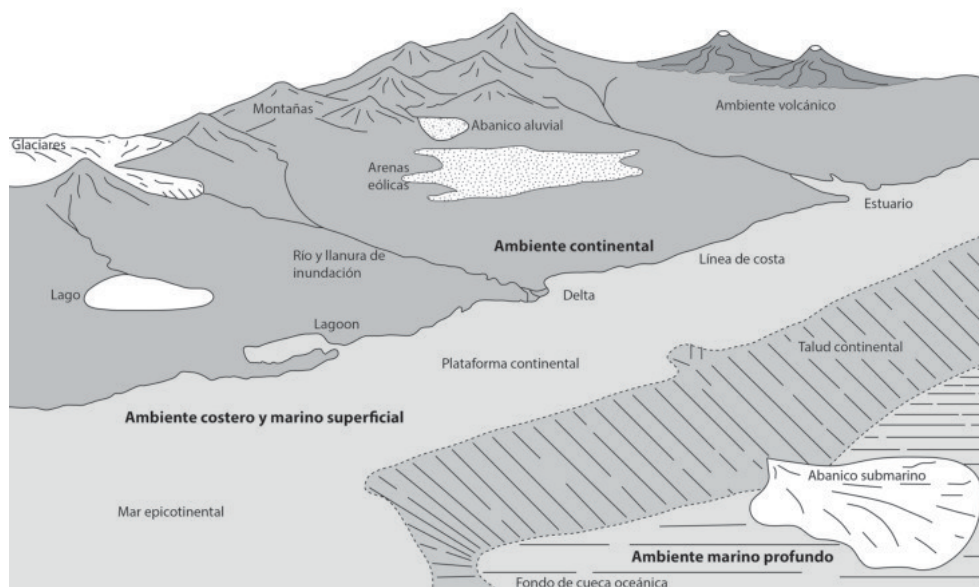


Figura 2.1: Resumen de los principales ambientes sedimentarios. (Nichols, 2009)

2.2.1.1 Sistemas aluviales

Los sistemas aluviales son producto de interacciones complejas de erosión y deposición, estos se forman a partir de la caída de detritos en zonas en la cual existe un cambio brusco de pendiente; estos depósitos están relacionados a condiciones húmedas, semiáridas o áridas (Collinson, 1996).

En cuanto a la clase de detritos de estos depósitos son predominantemente clásticos, variando desde el tamaño de grano de lodo fino hasta conglomerados de cantos rodados; en menor cantidad se pueden formar sedimentos por precipitación químicos en ambientes de inundación (Miall,

1992).

El estudio de abanicos aluviales actuales muestran que estos presentan tres partes (Figura 2.2), estas generalmente suelen progradar unas sobre las otras.

- *Abanico proximal o inner fan*, situada por encima del punto de inflexión; aquí es donde el flujo de agua se divide; los sedimentos en esta zona son gruesos.
- *Abanico medio o mid fan*, en esta zona los canales son anastomosados y presentan un notorio cambio de pendiente; en esta zona los sedimentos son menos gruesos que en el abanico proximal y se puede presentar una intercalación entre sedimentos gruesos y finos.
- *Abanico distal o distal fan*, esta zona esta representada por numerosos canales, con una pendiente muy débil; en esta zona pueden formarse zonas pantanosas o pequeños lagos; los sedimentos en esta zona son relativamente finos.

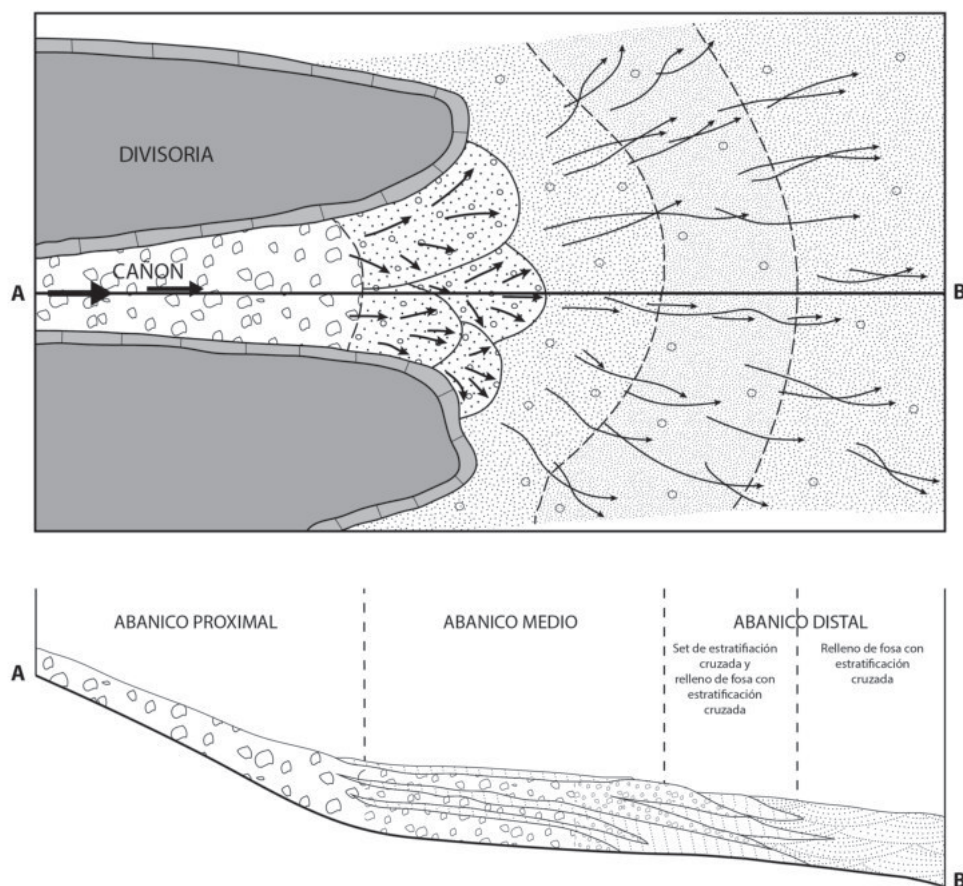


Figura 2.2: Vista en planta y sección de un cañón y sus respectivos tipos de abanicos. Los grosores de las flechas en la vista en planta indica la intensidad de los procesos fluviales. (McGowen y Groat, 1971)

Harvey (1997) sugiere que la proporción de material suministrado para estos depósitos responden a dos controles externos:

- *Factores pasivos*, estos incluyen la historia geológica, tectónica y geomorfológica. Según *Howard* (1977), hay tres ambientes contrastados de borde de cuenca y/o abanicos aluviales (Figura 2.2), los cuales controlan el espesor y extensión de las secuencias de los mismos y también el carácter y concordancia de las secuencias internas:
 - abanicos adyacentes a fallas de borde de cuenca relativamente permanentes, donde los sedimentos se acumulan a lo largo de la zona fallada (Figura 2.3a).
 - abanicos aluviales limitados por fallas de retroceso de borde de cuenca con acumulación de abanicos alineados y de moderado espesor (Figura 2.3b).
 - abanicos aluviales asociados a fallas de retroceso de borde de cuenca que geográficamente pueden dar lugar a extensas secuencias de material grueso, más jóvenes en la dirección del retroceso de las fallas (Figura 2.3c).
- *Factores dinámicos*, estos incluyen la actividad tectónica actual, clima y condiciones ambientales del nivel base.

El proceso de transporte dominante en estos tipos de depósitos es el *debris flow*, el cual consiste de una mezcla no seleccionada de agua, matriz sedimentaria y clastos gruesos. Ellos varían en su comportamiento dependiendo de la relación entre agua y sedimento, el tamaño de partícula de la matriz, especialmente el contenido de arcilla, la relación entre matriz y clastos, y el tamaño de clasto (*Harvey*, 1997).

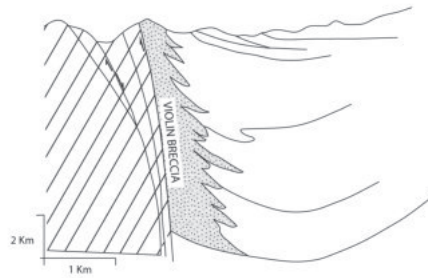
2.2.1.2 Sistemas fluviales

Los flujos de agua en ríos están confinados normalmente a canales, los cuales son depresiones en la superficie de la tierra la cual contiene el flujo; la llanura de inundación es el área de la tierra fuera de los canales que recibe agua solamente cuando el río se desborda. De esta manera los canales junto con las llanuras de inundación comprenden el ambiente fluvial (*Nichols*, 2009).

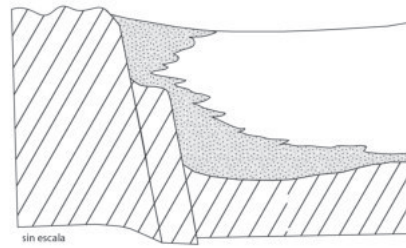
De manera general los ríos se clasifican según su forma (Figura 2.4) en:

- *Ríos trenzados*, contienen barras intercanales que están cubiertas por el flujo del nivel máximo
- *Ríos anastomosados*, contienen múltiples canales interconectados que están separados por llanuras de inundación; los dos primeros canales pueden ser sinuosos.
- *Ríos meandricos*, los cuales son sinuosos y solamente tienen barras depositacionales en las partes internas de los meandros.

a. Falla de borde de cuenca relativamente permanente (Crowell, 1973)



b. Borde de cuenca limitado por una falla de retroceso (Bull, 1968)



c. Borde de cuenca con falla de retroceso repetida (Steel y Wilson, 1975)



Figura 2.3: Controles tectónicos de los abanicos aluviales. Esquema de los rellenos de diferentes cuencas limitadas por fracturas. (Heward, 1977)

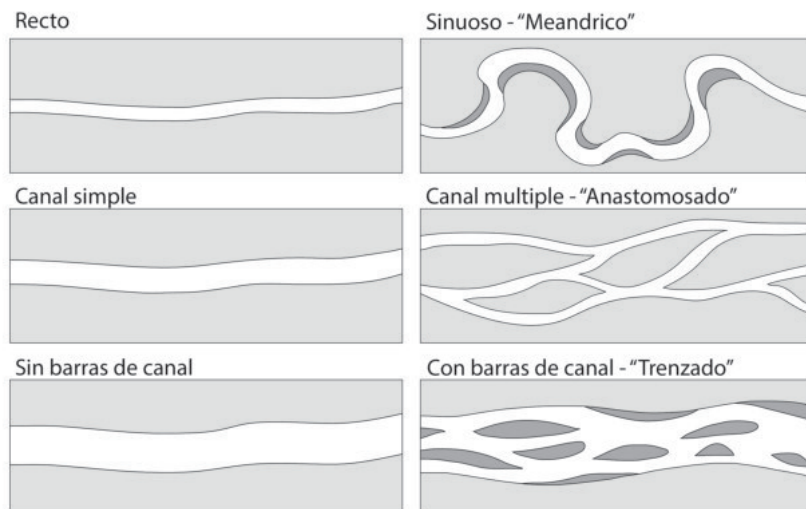


Figura 2.4: Tipos de ríos, basado en si el canal del río es recto o sinuoso (meandrico), si tiene uno o multiples canales (anastomosado), y si tiene barras intercanales (trenzado). Son posibles las combinaciones de estas. (Nichols, 2009)

2.2.1.3 Sistemas lacustres

Un lago se forma donde hay una depresión en la superficie tierra, la cual esta delimitada por un umbral, de manera que el agua acumulada en la depresión queda retenida; los lagos son alimentados por una o más corrientes que suministran agua y sedimentos de la región que los rodean (Nichols, 2009).

Según Talbot y Allen (1996) hay dos características de los lagos que destacan; la primera es su sensibilidad frente a los cambios climáticos, y la segunda es la variación brusca de facies sedimentarias en secuencias verticales como resultado del cambio de la fluctuación de la línea de costa y bioquímica en las agua de los lagos.

La mayoría de los sedimentos siliciclásticos depositados en los lagos son transportados por ríos ya sea en suspensión o por acarreo en el fondo del río. El transporte aéreo, transporte por glaciares y material volcánico pueden ser importantes localmente.

Carroll y Bohacs (1999) indican tres grandes asociaciones de facies lacustrinas; así se tienen a las facies fluvio-lacustrinas, facies de fluctuación profunda y facies evaporíticas. Además clasifican los lagos de acuerdo a un balance relativo de la relación entre el potencial de acomodación (principalmente tectónico) con sedimentos más el suministro de agua (principalmente climático), el balance controla la ocurrencia de lagos, su distribución, características, y la arquitectura estratigráfica. Esta clasificación genética subdivide a las cuencas lacustrinas en tres tipos (Figura 2.5):

- *Overfilled*, la tasa de afluencia de agua y el aporte de sedimentos generalmente exceden el potencial de acomodación; las fluctuaciones del nivel del lago impulsadas por el clima son mínimas, debido a que los flujos entrantes de agua son cercanamente iguales a los flujos salientes. Estos lagos estan estrechamente relacionados a sistemas fluviales y turberas; los lagos pueden ser profundos o superficiales, dependiendo de la geometría de la cuenca controlada estructuralmente; las facies dominantes son las fluvio-lacustrinas.
- *Balanced fill*, el potencial de acomodación del agua y aporte de sedimentos es aproximadamente igual durante el lapso de tiempo de la sedimentación de una unidad; el agua y el aporte de sedimentos son periódicamente suficientes para llenar el lago y crear flujos salientes superficiales; las facies de fluctuación profunda son dominantes, y quedan registrados los movimientos del borde del lago.
- *Underfilled*, las tasas del potencial de acomodación continuamente exceden el aporte de sedimentos y agua; las facies evaporíticas son típicas, las cuales pueden estar interestratificadas con niveles eólicos y de abanicos aluviales.

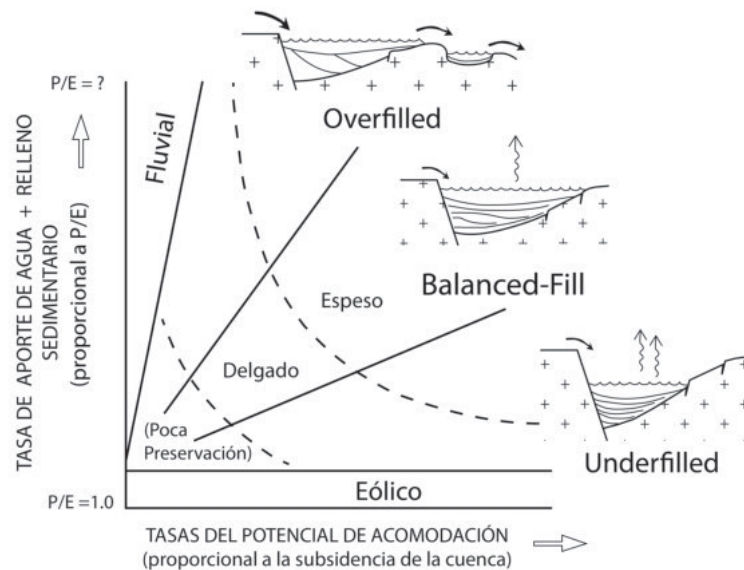


Figura 2.5: Modelos esquemáticos de tipos de lagos. P/E = precipitación/evaporación. (Carroll y Bohacs, 1999)

2.2.1.4 Sistema volcánico-magmático

La subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana produce, como consecuencia, actividad magmática evidenciada por los batolitos presentes a lo largo del territorio nacional, y también por los depósitos volcánicos.

El sistema volcánico-magmático está dividido en cuatro zonas (Figura 2.6) según su profundidad (Schmincke, 2004), se representa la generación del magma a partir de la fusión de rocas pre-existentes hasta la expulsión del material a la superficie de manera explosiva y efusiva.

Según Francis y Oppenheimer (2003) las clasificaciones clásicas de los tipos de actividad volcánicas, tomando en cuenta su composición, viscosidad, temperatura y contenido de volátiles, son:

- *Actividad hawaiana*: es la actividad más suave, tomando su nombre de los volcanes de las islas de Hawaii; el material de la erupción sale a altas temperaturas con una baja viscosidad; a veces suelen alternar con estadios más activos con efusión de eyectos correspondientes a cenizas básicas, brechas y aglomerados, todos de desarrollo local y poco voluminoso.
- *Actividad estromboliana*: es característico por una actividad explosiva intermitente, resultado de la liberación periódica del excedente de presión gaseosa. La mayor parte de la actividad consiste en la eyección de bombas y escorias incandescentes, acompañadas de escasa ceniza y pobre efusión de lavas; debido a la poca altura a la que es proyectado el material, se produce una copiosa acumulación proximal, que excede el ángulo de reposo (aprox. 33°), lo que origina que la redistribución del material se produzca por movimientos fluctuantes de masa gravitatorios, muy frecuentes en los conos de este tipo; el magma es generalmente de composición intermedia a básica y de mayor viscosidad que los de tipo hawaiano.

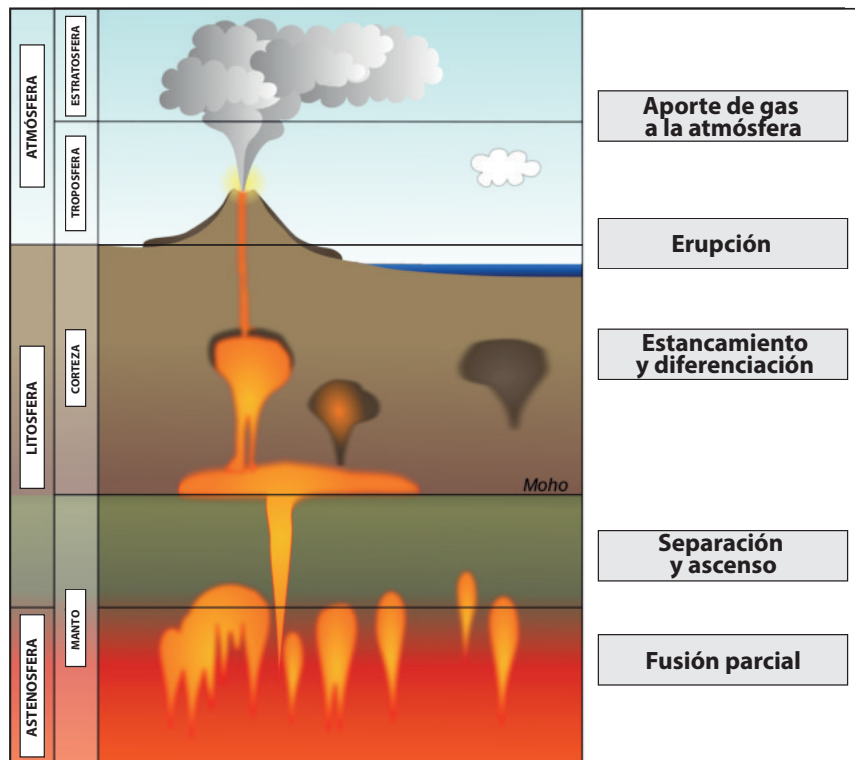


Figura 2.6: Sistema volcánico-magmático según Schmincke (2004).

- **Actividad vulcaniana:** constituye a los estrato-volcanes o volcanes compuestos, están formados por la alternancia de flujos de lava y material piroclástico; la estructura más simple es un cono empinado con un cráter en la cima, pero la alternancia de efusiones tranquilas y actividad explosiva provocan cambios frecuentes en la forma del cráter y la aparición de nuevos cráteres sobre los flancos del cono original; típicamente se desarrollan diques y filones capa dentro de la pila volcánica, así como coladas volcánicas y cenizas; las andesitas son los productos volcánicos más típicos y se asocian con dacitas y riolitas.

La composición magmática es diferente a los casos anteriores puede variar desde básica (basaltos) a ácida (dacitas y riolitas), sin embargo es más frecuentemente intermedia a félsica (andesitas).

Generalmente las efusiones comienzan con la formación de una nube eruptiva oscura de cenizas mezcladas con lapillo, bombas y muchas veces con explosiones hidromagmáticas. Las tefras, en su mayoría sólidas, constituyen conos de cenizas vítreas o líticas, brechas y mantos de cenizas de caída, con mayor dispersión areal que las coladas.

Este tipo de vulcanismo se produce en zonas de colisión, con subsidencia de la placa oceánica debajo de la continental.

- **Actividad pliniana:** Las erupciones plinianas están caracterizadas por su extrema violencia y dinámica producen la efusión continua de potentes flujos gaseosos que inyecta grandes volúmenes de materiales félsicos vesiculares en la alta atmósfera y en la estratósfera; el tope de

las columnas eruptivas suele alcanzar entre los 20 y 60 Km de altura, las que son dispersadas por cientos o miles de kilómetros por los vientos predominantes. Muchas veces, el espectacular vaciamiento de la cámara magmática que conlleva este tipo de fusión desencadena el colapso del terreno y la formación de una caldera amplia.

- *Actividad peleana*: Tiene lugar por eyección de magmas viscosos, intermedios y ácidos, en forma de corrientes con densidad, constituidas por partículas incandescentes en suspensión, descienden por los flancos del cono a gran velocidad, produciendo una acción devastadora. El material eyectado, es poco voluminoso, alcanza sólo distribución local y consiste en cascajo y brechas líticas, encauzadas en valles o acumulados en bajos topográficos; en la fase final de la erupción se produce la inyección de magma viscoso que conforma domos empinados, cuyo posterior derrumbe total o parcial desencadena una nueva erupción; la distribución de cenizas es mucho más reducida que en los tipos vulcanianos o plinianos.

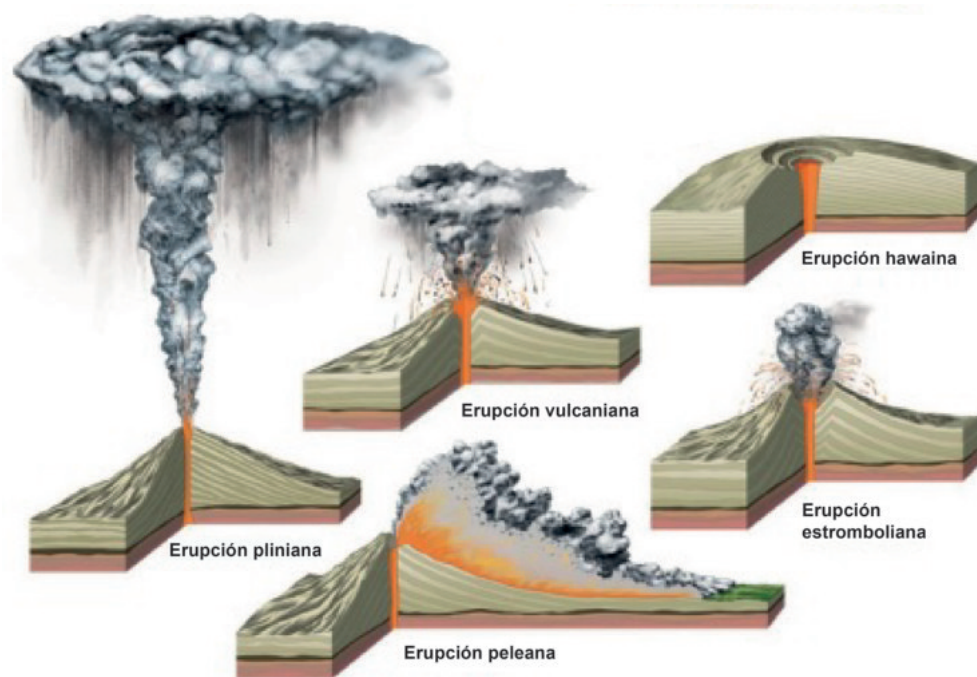


Figura 2.7: Tipos de actividad volcánica.

Según McPhie (1993), los depósitos volcánicos se clasifican en:

- *Depósitos volcánicos primarios*, los cuales están determinados por el tipo de erupción.
 - *erupciones explosivas*, producen una amplia variedad de depósitos piroclásticos.
 - *erupciones efusivas*, producen flujos de lava y domos.
 - *emplazamientos sin-volcánicos*, producen criptodomos, diques y sills.

- *Depósitos volcanoclásticos secundarios*, generados por procesos no volcánicos, especialmente por resedimentación y procesos específicos sedimentarios; estos depósitos pueden ser coetáneos o independientes de las erupciones volcánicas y ser producidas por actividades de meteorización, erosión y retrabajo de depósitos volcánicos pre-existentes.

2.2.2 Tipos de facies

Una litofacie es un cuerpo de roca con características específicas. Ésta puede ser una capa simple o un grupo de ellas. Idealmente, esta debería ser una roca distintiva que se formó bajo ciertas condiciones de sedimentación, reflejando procesos particulares, un grupo de condiciones o ambientes (Reading y Levell, 1996).

2.2.2.1 Facies sedimentarias

Para la descripción de diferentes facies, Miall (1977) propone la utilización de un sistema de códigos propios para cada facie que puede existir en sistemas fluviales, esta codificación toma en cuenta el tamaño de grano dominante y la textura o estructura de las facies (Figura 2.8).

A) *Facies de conglomerados*:

Estas facies presentan clastos en el rango de 2-64 mm; contienen clastos de variada composición, se diferencian en base a su textura y a su estructura interna; se han diferenciado cinco clases de estas facies.

- Conglomerados matriz-soportados, masivos (Gmm)*: Estas facies corresponden a conglomerados bien clasificados (subredondeados a redondeados), polimícticos con clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas; la matriz es areniscosa; el porcentaje de matriz es predominante con respecto a los clastos.
- Conglomerados matriz-soportados (Gmg)*: Estas facies corresponden a conglomerados bien clasificados, polimícticos con clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas, la matriz es areniscosa. El porcentaje de matriz es predominante con respecto a los clastos. La secuencia presenta una gradación normal o inversa.
- Conglomerados clasto-soportado, masivos (Gcm)*: Corresponden a conglomerados bien clasificados, polimimícticos con clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas; la matriz es areniscosa. El porcentaje de clastos es predominante con respecto a la matriz.
- Conglomerados con laminaciones cruzadas oblicuas (Gt)*: Facies compuestas de conglomerados con laminaciones cruzadas; los conglomerados son polimícticos y bien clasificados; con matriz areniscosa.
- Conglomerados con laminaciones horizontales (Gh)*: Facies compuestas de conglomerados con laminaciones horizontales; los conglomerados son polimícticos y bien clasificados; con matriz areniscosa.

B) *Facies de areniscas:*

Estas facies son producidas por el transporte y acumulación de partículas de arena, las cuales van en el rango de 0.0625-2 mm. Estas areniscas son de coloración verdosa y contienen cristales de origen volcánico, se diferencian en base a su textura y estructura interna; se han podido diferenciar cuatro tipos de estas facies.

- a) *Areniscas masivas (Sm)*: Estas facies corresponden a areniscas que presentan un aspecto masivo; presentan cristales de origen volcánico y una coloración verdosa típica; el tamaño de grano varía de fino a grueso.
- b) *Areniscas con laminaciones cruzadas oblicuas (St)*: Estas areniscas estan compuestas por granos que varían de fino a grueso, presenta una coloración verdosa típica y presentan laminaciones cruzadas.
- c) *Areniscas con laminaciones horizontales (Sh)*: Estas facies corresponden a areniscas que estan compuestas por granos que varían de fino a grueso, presenta una coloración verdosa típica y presentan laminaciones horizontales.
- d) *Areniscas con ripples (Sr)*: Estas facies esta constituido por areniscas cuarzosas de grano grueso a medio, estas areniscas presentan ripples marks.

C) *Facies de limolitas:*

Estas facies son producidas por el transporte y acumulación de partículas de limos y arcillas, las cuales son menores a 0.0625mm; se han podido diferenciar tres tipos de estas facies.

- a) *Limolitas masivas (Fm)*: Estas facies se presentan en paquetes finos y varian en coloración de verde a marrón rojizo. Presentan aspecto masivo y grietas de desecación.
- b) *Limolitas con laminaciones finas (Fl)*: Estas facies se presentan en laminaciones finas en paquetes delgados, y varían de coloración verdosa a marrón rojizo, a veces pueden presentar unos pequeños ripples.
- c) *Limolitas laminadas a masivas (Fsc)*: Estas facies pueden presentarse con laminaciones difusas a un aspecto masivo.

D) *Facies de calizas:*

Estas facies son producidas por el transporte y precipitación de material calcáreo. Se han podido diferenciar dos tipos de estas facies.

- a) *Calizas con laminaciones algáreas (Ll)*: Estas facies estan representadas con calizas tipo mudstone con laminaciones algáreas; los estratos varían de 0.5 a 1 m.
- b) *Calizas masivas (Lm)*: Estas facies estan representadas por calizas tipo mudstone a grainstone, las cuales presentan un aspecto masivo; los estratos varían de 0.5 a 1 m.

Código de Facies	Facies	Estructuras sedimentarias	Interpretación
Gmm	Gravas matriz-soportada, masiva	Gradación débil	<i>Debris Flow</i> (alta resistencia y/o viscoso)
Gmg	Gravas matriz-soportada	Gradación inversa o normal	<i>Debris Flow</i> pseudoplástico (baja resistencia y /o viscoso)
Gcm	Gravas clasto-soportada, masiva	-	<i>Debris Flow</i> pseudoplástico (carga de fondo inerte y/o flujo turbulento)
Gt	Grava estratificada	Laminación oblicua curva	Relleno de canales menores
Gh	Grava estratificada	Laminación horizontal	Cuerpo longitudinal, depósito de <i>lag</i> , depósito tamizado (bien seleccionado)
Sm	Arenisca de grano fino a grueso	Masiva o laminación débil	Depósito de flujo gravitacional
St	Arenisca de grano fino a grueso	Laminación oblicua curva	Dunas (3D) de crestas sinuosas o linguoide
Sr	Arenisca de grano fino a grueso	Laminación cruzada con ripples	Ripples (régimen de flujo bajo)
Sh	Arenisca de grano fino a grueso	Laminación horizontal	Flujo planar (flujo crítico)
Fm	Limolitas	Masiva con grietas de desecación	Llanura de inundación, canales abandonados, depósito de pantano
Fl	Limolitas	Laminación fina	Llanura de inundación, canales abandonados, depósito de flujo menguante
Fsc	Limolitas	Masivas o laminación difusa	Llanura de inundación, canales abandonados.
LI	Caliza	Laminación algareas	Depósitos lacustres de fluctuación profunda
Lm	Caliza	Masivas	Interacción de ambientes fluviales y lacustres

Figura 2.8: Clasificación de las facies sedimentarias (Tomado y modificado de *Miall* (1977) y *Carroll y Bohacs* (1999)).

2.2.2.2 Facies lávicas

D'Elía (2010) propone la utilización de un sistema de códigos para las facies volcánicas lávicas, estos códigos toman en cuenta la litología y la estructura, de modo que estas características permitan interpretar las condiciones de formación y depositación. Se han determinado un total de tres de estas facies (Figura 2.9).

- a) *Lava andesítica coherente (LAc_(ves))*: Estas facies son representadas por rocas volcánicas efusivas de composición andesítica; estas rocas son masivas y de textura porfírica con fenocristales, en su mayoría son de plagioclasas; ocasionalmente estas facies pueden presentar vesículas.
- b) *Lava andesítica autoclástica (LAa_(ves))*: Estas facies están representadas por rocas volcánicas efusivas de composición andesítica que sufrieron un proceso autoclástico; los clastos se presentan angulosos. Ocasionalmente estas facies pueden presentar vesículas.
- c) *Lava basáltica coherente (LBc_(ves))*: Litofacies compuestas por rocas volcánicas lávicas de composición basáltica; estas rocas son de aspecto masivo y textura afírica o textura porfírica con fenocristales de plagioclasas; estas facies ocasionalmente pueden presentar vesículas.

Código de Facies	Facies	Estructuras	Interpretación
LAc_(ves)	Lavas andesíticas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas	Masiva o con vesículas	Lavas de composición andesítica. Período de crecimiento de fenocristales seguido de una rápida nucleación y escaso crecimiento resultado de un enfriamiento rápido en ambiente subaéreo. Durante el enfriamiento de la lava se puede producir un escape de gases formando las vesículas, las cuales posteriormente pueden ser rellenadas por otros minerales.
LAa_(ves)	Lavas andesíticas autobrechadas. Los clastos se presentan masivos y angulosos	Masiva o con vesículas	Lavas que experimentaron procesos autoclásticos no explosivos: autobrechamiento subaéreo. Durante el enfriamiento de la lava se puede producir un escape de gases formando las vesículas, las cuales posteriormente pueden ser rellenadas por otros minerales.
LBc_(ves)	Lavas basálticas de textura afírica o de textura porfírica con algunos fenocristales de plagioclasas	Masiva o con vesículas	Lavas de composición basáltica. Período de crecimiento de fenocristales seguido de una rápida nucleación y escaso crecimiento resultado de un enfriamiento rápido en ambiente subaéreo. Durante el enfriamiento de la lava se puede producir un escape de gases formando las vesículas, las cuales posteriormente pueden ser rellenadas por otros minerales.

Figura 2.9: Clasificación de las facies lávicas (Tomado de D'Elía (2010)).

2.2.2.3 Facies piroclásticas

Branney y Kokelaar (2002) proponen el uso de códigos para las facies piroclásticas, estos códigos toman en cuenta la litología y estructura de la roca. De esta manera se permite describir e interpretar las características depositacionales de los piroclastos en estas secuencias. Se han determinado nueve de estas facies.

- a) *Brecha con matriz o clasto soportado (mlBr)*: Estas facies están representadas por brechas piroclásticas o tobas brechas, las cuales pueden ser matriz soportada o clasto soportada; estas facies son ricas en clastos angulosos, y contienen algunos clastos subangulosos a sudredondados, el tamaño de los clastos son mayores a 64 mm; los clastos se encuentran envueltos en una matriz de origen piroclástico que contienen cenizas y/o cristales.
- b) *Toba masiva (mT)*: Estas facies corresponden a tobas de aspecto masivo, pueden existir la presencia pero sin predominio de uno de los componentes fundamentales en la clasificación de las tobas (líticos, pómez y cristales); estas facies están compuestas en su mayoría de ceniza volcánica.
- c) *Toba con estratificación (sT)*: Estas facies comprenden tobas que exhiben capas que muestran una estratificación ligera a bien definidas; cuyos componentes suelen presentar cenizas, líticos, pómez y cristales en variadas proporciones.
- d) *Toba lítica (mlT)*: Litofacies que corresponden a tobas de aspecto masivo, existe un predominio de fragmentos líticos sobre la presencia de cristales y pómez, los cuales se encuentran en menor proporción; los fragmentos líticos suelen diferir en composición con el de la matriz.
- e) *Toba lítica con vesículas (veslT)*: Son facies compuestas por tobas en las que existe un predominio de fragmentos líticos sobre los otros dos componentes (cristales y pómez); estas tobas presentan vesículas producidas por la depositación de corrientes piroclásticas húmedas.
- f) *Toba lítica soldada (wlT)*: Estas facies corresponden a tobas con predominio de fragmentos líticos, presentan un alto grado de compactación producidas por las altas temperaturas de los flujos piroclásticos durante su depositación.
- g) *Toba de cristales (mcrT)*: Estas facies corresponden a tobas de aspecto masivo, existe un predominio de cristales sobre los fragmentos líticos y pómez; estos cristales se encuentran fragmentados producidas por la explosión.
- h) *Toba de cristales con estratificación (scrT)*: Estas facies corresponden a tobas ricas en cristales con presencia de fragmentos líticos y pómez en menores proporciones; estas tobas presentan capas que se muestran bien a ligeramente pronunciadas.
- i) *Toba de cristales soldada (wcrT)*: Litofacies compuestas por tobas, en las cuales el componente predominante son los cristales, los fragmentos líticos y pómez están presentes en menores

proporciones; estas tobas presentan un alto grado de compactación producidas por las altas temperaturas de los flujos piroclásticos durante la depositación.

Código de Facies	Facies	Estructuras	Interpretación
mlBr	Brechas piroclásticas, tobas brechas o aglomerados con predominancia de bombas y bloques con moderada a pobre selección	Masiva	Depósito de bloques y cenizas producidos por el colapso gravitacional de un domo, coladas dómicas y/o flujos de lavas
mT	Tobas con presencia de algunos cristales, líticos o pómez	Masiva	Depósitos de caída distales de una pluma volcánica pliniana o subpliniana deambientes subaéreos o subaéreos
sT	Tobas con presencia de algunos cristales, líticos o pómez	Estratificación muy fina	Depósitos de corrientes piroclásticas con límites de flujo dominado por tracción
mlT	Tobas ricas en componentes líticos, con cristales y pómez en menor proporción	Masiva	Depósitos de caída con presencia fragmentos líticos arrancado del basamento durante la explosión
vesIT	Tobas ricas en componentes líticos, con cristales y pómez en menor proporción	Con vesículas	Depósitos de caída con rico en componentes líticos con vesículas producidas por la depositación de corrientes piroclásticas húmedas
wIT	Tobas ricas en componentes líticos, con cristales y pómez en menor proporción. Toba de un alto grado de compactación	Masiva	Depósitos de caída ricos en componentes líticos, estas tobas presentan un alto grado de compactación producto de la interacción con flujos piroclásticos a altas temperaturas
mcrT	Tobas ricas en cristales, con fragmentos líticos y pómez en menor proporción	Masiva	Depósitos de caída distales de la pluma volcánica con presencia cristales fragmentados producto de la explosión, la cristalización se produjo en la cámara magmática antes de la explosión
scrT	Tobas ricas en cristales, con fragmentos líticos y pómez en menor proporción	Con estratificación	Depósitos de corrientes piroclásticas ricas en cristales con límites de flujo dominado por tracción
wcrT	Tobas ricas en cristales, con fragmentos líticos y pómez en menor proporción. Toba con un alto grado de compactación	Masiva	Depósitos de caída ricos en cristales, estas tobas presentan un alto grado de compactación producto de la interacción con flujos piroclásticos a altas temperaturas

Figura 2.10: Clasificación de las facies piroclásticas (Tomado de *Branney y Kokelaar (2002)*).

2.2.3 Geoquímica

La geoquímica tradicionalmente es la ciencia encargada de estudiar el quimismo de la tierra, es decir es la encargada de la distribución de los elementos y sus isótopos en las diversas geosferas (litosfera, mesósfera, núcleo, atmósfera, hidrósfera).

Sin embargo desde un punto de vista interpretativo la geoquímica también estudia la composición y dinámica de los elementos químicos en la tierra, determinando la abundancia relativa y absoluta de los elementos, la distribución y migración de los elementos entre las diferentes geósferas que conforman la Tierra. Todos los procesos naturales ocurren dentro de ambientes geoquímicos primarios y secundarios.

2.2.3.1 Geoquímica de elementos mayores

Los elementos mayores son aquellos que predominan en el análisis químico de la roca; cuya presencia de estos elementos se expresan en tanto por ciento (wt %) del óxido; entre los elementos medidos en los análisis se encuentran Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P. Estos elementos son usados principalmente de tres maneras: 1) en la clasificación de la roca, 2) en la construcción de diagramas de variación y 3) como un medio de comparación de la composición de las rocas determinadas experimentalmente. Adicionalmente, los elementos mayores son usados con elementos trazas en la identificación de las características tectónicas originales de rocas ígneas y algunas rocas sedimentarias (Rollinson, 1993).

La aplicación de la química de elementos mayores para la clasificación de las rocas es ampliamente usada en la petrología ígnea y sedimentaria, tales son los estudios de (Le Bas y Streckeisen, 1991; Pettijohn et al., 1972; Herron, 1988); otros estudios presentan la utilidad del uso de los elementos mayores para estimar la fuente de procedencia de los sedimentos (Roser y Korsch, 1988).

2.2.3.2 Geoquímica de elementos trazas

Un elemento traza está definido como un elemento que está presente en una roca en abundancia menos de 0.1 wt %, es decir, es menos que 1000 partes por millón (ppm). Algunas veces los elementos trazas forman especies mineralógicas propias pero comúnmente ellos sustituyen a los elementos mayores formadores de las rocas.

Los estudios de elementos trazas se han vuelto una parte vital de la petrología moderna y son de mayor utilidad que los elementos mayores para discriminar los procesos petrogenéticos (Rollinson, 1993). La aplicación de los elementos trazas en el caso de las rocas ígneas son usados en la clasificación de las rocas volcánicas (Winchester y Floyd, 1977), series magmáticas (MacLean y Barrett, 1993), discriminación geotectónica (Gorton y Schandl, 2000) y relaciones de elementos trazas para estimar la diferenciación magmática (Mantle y Collins, 2008).

2.2.3.3 Tierras raras y diagrama multielemental

Actualmente se está considerando que las tierras raras (REE) son más útiles por sus variadas aplicaciones e importancia en la petrología ígnea, sedimentaria y metamórfica. Las tierras raras están conformadas por 17 elementos que se encuentran en el Grupo 3 de la Tabla Periódica, desde el Lantano (57) hasta el Lutecio (71), incluyendo a los elementos semejantes en sus propiedades químicas al Escandio (21) y al Ytrio (39) (Lau, 2009).

A las tierras raras se les conoce como el Grupo de los Lantánidos, por su configuración electrónica producen la contracción Lantánida, que es la disminución progresiva y gradual del tamaño de estos átomos de tierra raras, al aumentar el número atómico desde el Lantano (57) al Lutecio (71); todas las tierras raras tienen valencia 3+, el Ce además tiene valencia 4+ y el Eu también tiene valencia 2+ (Lau, 2009).

Las tierras raras se clasifican en tierras raras ligeras (LREE) y las tierras raras pesadas (HREE) de acuerdo a su configuración electrónica (Figura 2.11), la que le permite mostrar propiedades particulares. Las propiedades y particularidades de las tierras raras permiten ser utilizadas en los diagramas multielementales o también llamados diagramas spider, los cuales son usados para interpretaciones petrogenéticas; para la utilización de las tierras raras en estos diagramas deben ser previamente normalizadas a una referencia estándar para eliminar la abundante variación entre los números atómicos pares e impares de los elementos, y porque permite observar cualquier fraccionamiento de las tierras raras con respecto a la referencia estándar. Para el caso de las rocas ígneas volcánicas, las tierras raras deben ser normalizadas al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), mientras que para las rocas sedimentarias son normalizadas a la corteza superior (Taylor y McLennan, 1985; Rudnick y Fountain, 1995).

GRUPO

PERIODO

MASA ATÓMICA RELATIVA (1)

GRUPO IUPAC

NÚMERO ATÓMICO

SÍMBOLO

NOMBRE DEL ELEMENTO

ESTADO DE AGREGACIÓN (25 °C)

Metales

Semimetales

No metales

Metales alcalinos

Metales alcalinotérreos

Elementos de transición

Lantánidos

Actínidos

Anfígenos

Halógenos

Gases nobles

Ne - gaseoso

Hg - líquido

Fe - sólido

Tc - sintético

Copyright © 2017 Eni Generali

TIERRAS RARAS PESADAS (HREE)

TIERRAS RARAS LIGERAS (LREE)

LANTÁNIDOS

ACTÍNIDOS

1	2											13	14	15	16	17	18
1	2											13	14	15	16	17	18
3	4											5	6	7	8	9	10
11	12											13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

Figura 2.11: Tabla periódica de los elementos químicos.

2.3 Marco conceptual o glosario

- *Ambiente Geoquímico*: conjunto de factores como la temperatura, presión y potenciales físico-químicos que acompañan a los procesos geoquímicos y en donde se determinan la estabilidad de los elementos mineralógicos en las fases minerales y fluidas mineralizantes.
- *Apófisis*: parte saliente o cúpula de un macizo granítico.
- *Borde de cuenca*: límite de una cuenca, estos límites restringen el aporte del sedimento hacia el centro de la cuenca.
- *Caliza mudstone*: roca calcárea constituida por granos carbonáticos y matriz de micrita. La matriz de micrita es mayor al 90 %.
- *Caliza grainstone*: rocas calcárea constituida por granos carbonáticos y matriz de micrita. Los granos están en contacto unos con otros y constituyen entre el 50 y 90 % del total de la roca.
- *Conglomerado polimítico*: es una roca sedimentaria compuesta por una matriz y clastos, el término polimítico hace referencia a la variedad composicional de los clastos.
- *Cuencas de intra-arco*: es una cuenca sedimentaria del margen continental, relacionada con la subducción, situada en la parte interna del arco insular
- *Cuencas de antepaís*: es una depresión flexural ubicada "detrás" de un orógeno en donde se acumulan sedimentos provenientes principalmente del mismo. Estas cuencas sedimentarias se forman en escalas de tiempo de entre millones y cientos de millones de años.
- *Debris flow*: son fenómenos geológicos en los que masas de suelo cargadas de agua y roca fragmentada se precipitan por las laderas de las montañas, se canalizan hacia los canales de las corrientes, atrapan objetos en su camino y forman depósitos espesos y lodosos en los valles.
- *Discordancia progresiva*: tipo de discordancia sintectónica con una disposición en abanico de una serie de estratos, de manera que los inferiores se encuentran concordantes con la serie infrayacente, y los superiores forman un ángulo cada vez mayor con ella.
- *Diferenciación magmática*: es el proceso que cambia la composición química de los magmas y sus rocas derivativas. Las tres principales formas de cambiar la composición de un magma, es decir diferenciarlo, es mediante cristalización fraccionada, contaminación (o asimilación) cortical y mezcla de magmas distintos.
- *Estratotipo*: es la secuencia estratigráfica específica usada para la definición ó caracterización de la unidad estratigráfica o límite a ser definido.
- *Facies*: conjunto de caracteres que definen una roca, grupo de rocas o un depósito.

- *Ignimbrita*: es una roca ígnea y depósito volcánico que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos vítreos. Las ignimbritas suelen ser de composición intermedia a felsica.
- *Laminación algárea*: estructura sedimentaria primaria presente en las rocas calcáreas. Son estructuras finamente estraificadas de morfologías diversas, originadas por la producción, captura y fijación de partículas carbonatadas por parte de biopelículas de cianobacterias en aguas someras.
- *Litoestratigrafía*: disciplina dentro de la estratigrafía encargada de la caracterización litológica (composición y estructura) de las sucesiones estratigráficas y de la definición de unidades litoestratigráficas, como las formaciones.
- *Olítolito*: masa de sedimentos consolidada, en general de grandes dimensiones, que se emplacea en el seno de una sucesión sedimentaria tras deslizarse por gravedad a lo largo del talud de una cuenca sedimentaria.
- *Ponding*: cuerpo pequeño de agua como el de un lago.
- *Series magmáticas*: es un conjunto de rocas relacionadas en espacio y tiempo con caracteres químicos y mineralógicos comunes. Tal afinidad química y mineralógica señala que todas esas rocas se han derivado de una fuente común, llámese magma o cualquier otro tipo de fenómeno geológico.
- *Silicificación*: proceso por el que la sílice (normalmente criptocristalina) se introduce en rocas no silíceas, ya sea por relleno de los poros o por reemplazamientos.
- *Slumping*: desplome o derrumbamiento de una secuencia sedimentaria por una desestabilización de la cuenca sedimentarias
- *Slump*: estructura sin-sedimentaria formada por una desestabilización en la plataforma de la cuenca.
- *Tefra*: cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica.
- *Zonas volcánicas intraplaca*: es un tipo de actividad volcánica, normalmente de naturaleza efusiva, en que el magma es liberado a través de centros de actividad volcánica situados en el interior de las placas litosféricas, los denominados puntos calientes (hot spots).

Capítulo 3

Hipótesis y variables

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Se plantea que la secuencias sedimentarias y volcánicas de la Formación Pichu se formaron antes del vulcanismo del Grupo Tacaza, por esta razón las características geoquímicas del vulcanismo de cada unidad deberán poseer diferencias entre ellas.

3.1.2 Hipótesis específica

Los análisis sedimentológicos, litogeoquímico permitirán caracterizar las secuencias de la Formación Pichu para diferenciarlas de otras unidades.

3.2 Identificación de variables

3.2.1 Variables independientes

- Resultados geoquímicos de las rocas.
- Características sedimentológicas.

3.2.2 Variables dependientes

- Clasificación químicas de las rocas.
- Facies y ambientes depositacionales.

3.2.3 Variables Intervinientes

- Geología
- Geoquímica

- Petrología
- Sedimentología
- Estratigrafía
- Vulcanismo

3.3 Operacionalización de variables

TIPOS DE VARIABLES	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
VARIABLES INDEPENDIENTES	Resultados geoquímicos de las rocas	-Valores de elementos mineralógicos	-Técnicas analíticas: Fusión de metaborato de litio ICP-AES y Fusión de peróxido de sodio ICP-AES/MS	-Espectrometro de masas -Evaluación cualitativa
	Características sedimentológicas	-Granulometría y disposición del elemento	-Observaciones macroscópicas	-Fichas de registros sedimentológicos
VARIABLES DEPENDIENTES	Clasificación química de las rocas	-Rocas volcánicas -Rocas sedimentarias	-Evaluación	-Diagramas de Clasificación -Diagramas de dispersión
	Litofacies y ambientes depositacionales	-Códigos de facies y asociación de facies	-Evaluación	-Test cualitativo

Capítulo 4

Metodología de la investigación

4.1 Tipo y diseño de la investigación

El presente estudio es observacional, descriptivo, transversal, en parte retrospectivo y en parte prospectivo.

El estudio es observacional pues tiene como objetivo la observación y el registro de los acontecimientos sin intervención alguna en el curso natural de estos; el estudio es descriptivo porque se describen las características de los parámetros en estudio; el estudio es transversal porque el registro de información se realizó en un tiempo determinado; es en retrospectivo porque se cuenta con información obtenida de laboratorio en la cual no se tuvo una participación directa, y el estudio es en parte prospectivo porque se cuenta con información propia registrada durante las labores de campo.

4.2 Unidad de análisis

El soporte de esta investigación está constituido por las facies sedimentarias y volcánicas de la Formación Pichu que se encuentran en la cabecera de la cuenca del río Tambo.

4.3 Población de estudio

El escenario de esta investigación involucra los diferentes tipos de rocas sedimentarias y volcánicas de la Formación Pichu que se encuentran en la cabecera de la cuenca del río Tambo.

4.4 Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra estará sujeto al reconocimiento de campo, teniendo en cuenta la representatividad donde se presentan las facies en la zona de estudio.

4.5 Selección de muestra

La selección de muestras y de datos se realizará convenientemente en zonas representativas, las cuales serán determinadas en los trabajos de pre-campo (recopilación bibliográfica, interpretación de imágenes satelitales).

4.6 Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se hará en varias fases, las cuales incluyen una etapa de gabinete y la etapa de campo. En la etapa de gabinete se realizan labores previas a los trabajos de campo; las labores que realizan son la recopilación de información bibliográfica y la fotointerpretación geológica de la zona de estudio. Por otro lado la etapa de campo involucra el levantamiento de columnas estratigráficas, el muestreo y el cartografiado geológico.

4.7 Presupuesto

El presente trabajo de investigación fue realizado en el marco del Proyecto ACT01: Línea de Base Geoambiental en la cuenca del río Tambo, proyecto perteneciente a la Dirección de Geología Regional del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por lo cual el financiamiento para este estudio es realizado por esta Institución.

4.8 Cronograma de actividades

34

ACTIVIDADES A REALIZAR		2016												2017																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Setiembre																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1

Capítulo 5

Generalidades

5.1 Introducción

Según la topografía actual se define que desde la fosa Perú-Chile hasta el escudo brasilero existen tres regiones paralelas que caracterizan a los Andes Centrales: el Antearco andino, los Altos Andes y la Cuenca de Antepaís (*Sébrier et al.*, 1988). El antearco andino presenta dos unidades morfoestructurales: el Talud Continental y la Cuenca de Antearco que están separadas por la cordillera de la costa; los altos andes presenta tres unidades morfoestructurales: la cordillera Occidental, el Altiplano y la cordillera Oriental. La Cuenca de Antepaís presenta dos unidades morfoestructurales: la Zona Subandina y la Llanura Amazónica.

El área de estudio se encuentra ubicada en el borde Oriental de cordillera occidental del sur del Perú y presenta una gran variedad de unidades litoestratigráficas y estructuras geológicas; las unidades litoestratigráficas abarcan parte del Mesozoico y el Cenozoico y es estructuralmente compleja por la gran variedad de estructuras presentes, las que se encuentran dentro de los dominios estructurales de Alto Condoroma - Caylloma y de la Cordillera Occidental.

5.1.1 Ubicación y accesibilidad

El área de estudio se encuentra limitada por las coordenadas UTM WGS84 8257747 N, 302374 E, 8168300 N y 368337 E; abarca la parte superior de la cuenca del río Tambo, entre los departamentos de Moquegua y Puno, al Sur del Perú; a los alrededores de las localidades de Ichuña, Chojata, Carumas y Muilaque (Figura 5.1). El área de estudio (cuadro en rojo) involucra de norte a sur las hojas de Lagunillas (32-u), Ichuña (33-u), Pichacani (33-v) y Omate (34-u).

Las carreteras principales para acceder al área de estudio son la carretera Interoceánica que va de Juliaca a Santa Lucía o desde la carretera Interoceánica Sur desde la ciudad de Puno, luego se pueden seguir otras carreteras y trochas que acceden a las localidades de Tincopalca, Ichuña, Chojata y Yalagua.

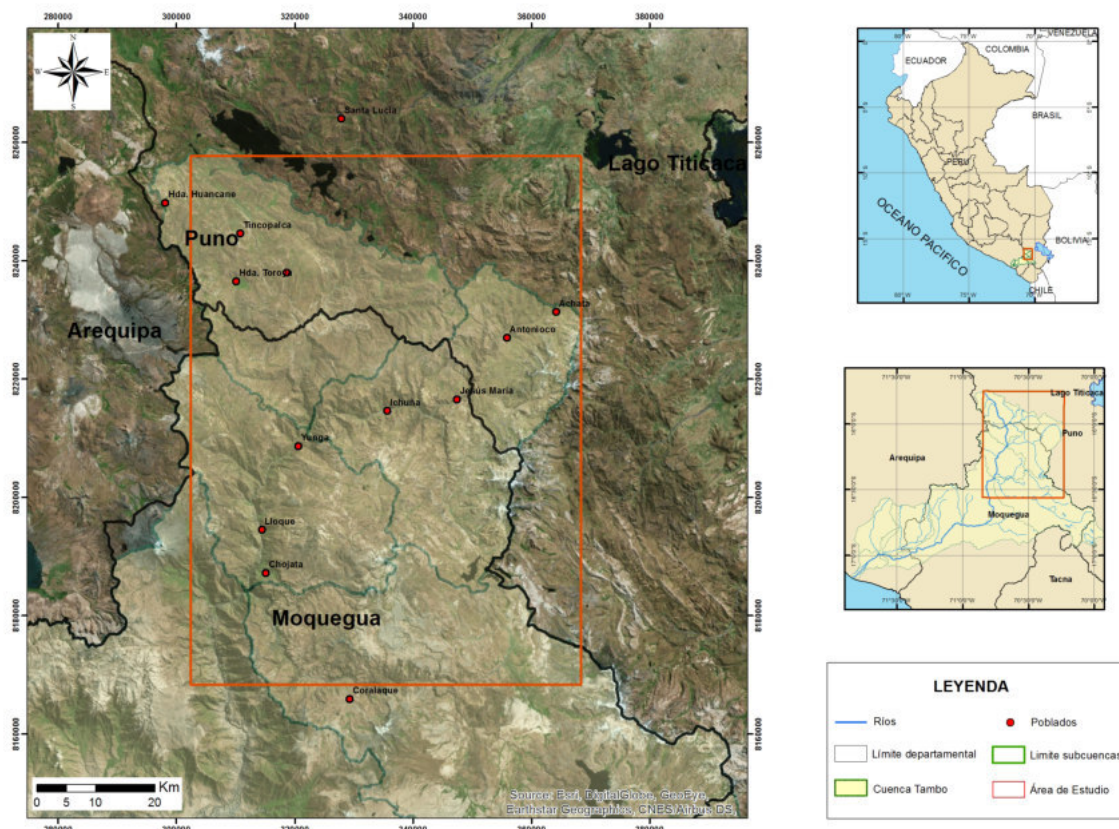


Figura 5.1: Ubicación del área de estudio.

5.1.2 Geomorfología

El área de estudio morfológicamente se encuentra entre la Cordillera Occidental y la Franja de Conos Volcánicos del Sur del Perú; donde se observan hasta tres zonas geomorfológicas diferentes estas son: los valles, la puna y las pampas.

- **Valles:** Se presentan encañonados, con perfiles transversales en "V". La génesis de estos valles se produjeron por la incisión del río Tambo y los afluentes a este.
- **Punas:** Zonas comprendidas sobre los 4000 m.s.n.m. cuyo paisaje típico está dado por grandes pampas separadas por suaves colinas y en algunos casos por montañas agrestes.
- **Pampas:** Están constituidas por grandes altiplanicies, en las cuales los cursos de agua son raros, siempre de carácter temporal.

5.1.3 Geología del área de estudio

Estructuralmente, el área de trabajo se encuentra enmarcada por los dominios tectónicos de Alto Condoroma – Caylloma y Cordillera Occidental (Carlotto *et al.*, 2009). Según las actualizaciones de las hojas de Ichuña, Omate y Lagunillas afloran unidades litoestratigráficas que representan una variedad de unidades sedimentarias, volcano-sedimentarias y volcánicas, las cuales abarcan un amplio rango de edades que van desde el Jurásico medio hasta el plioceno (Figs. 5.3 y 5.2).

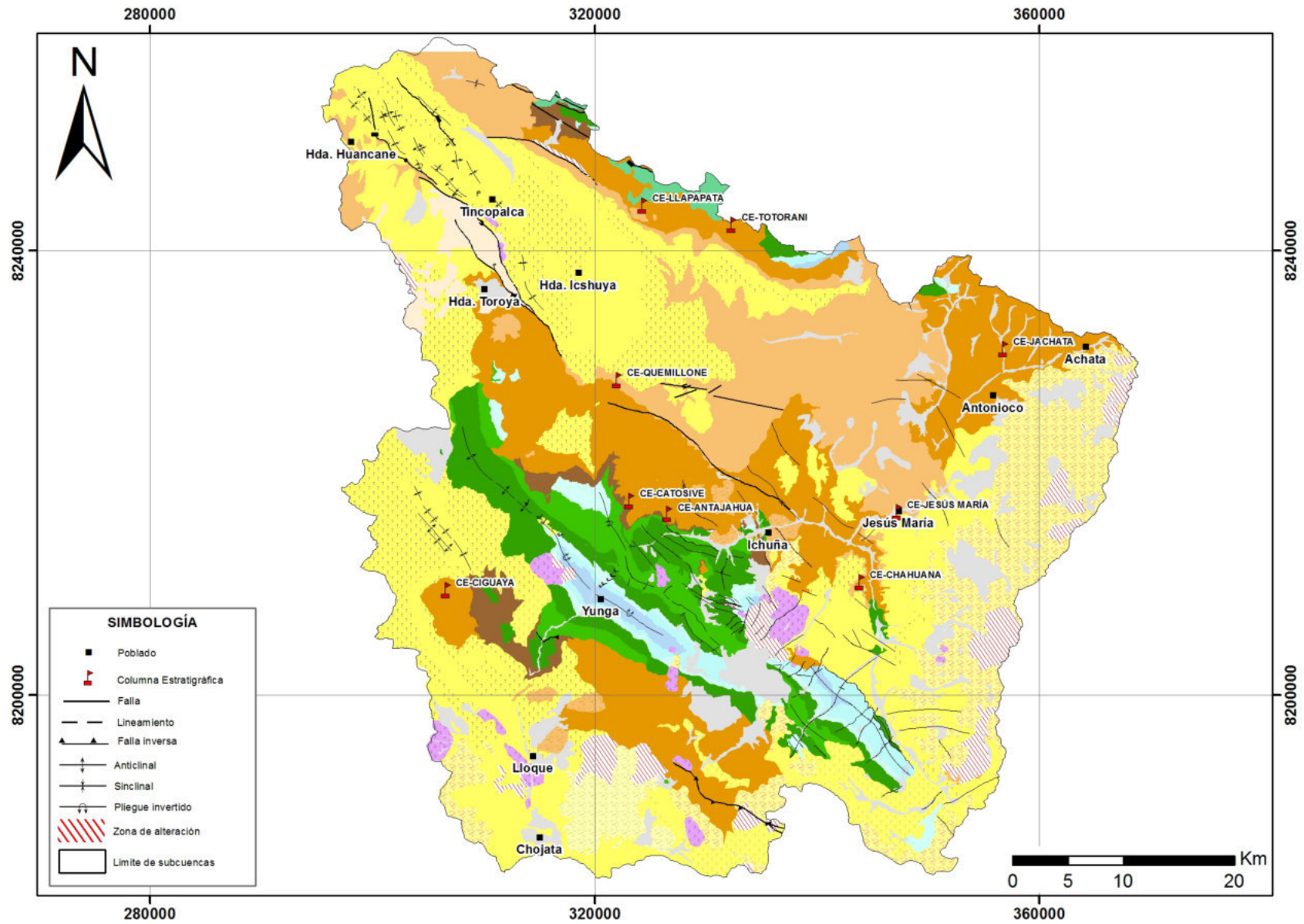


Figura 5.2: Mapa geológico esquemático del área de estudio.

ERA	PERIODO	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Qh-fl/Qh-al/Qh-co	
	NEÓGENO	PLIOCENO	GPO. BARROSO	
		MIOCENO	GPO. MAURE	GPO. SILLAPACA / FM. LLALLAHUI
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	GPO. TACAZA	
		EOCENO	FM. PICHU	
		PALEOCENO	GPO. PUNO	
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	FM. AYABACAS	
		INFERIOR	FM. MURCO	
	JURÁSICO	SUPERIOR	GPO. YURA	FM. HUALHUANI
			GPO. YURA	FM. GRAMADAL
			GPO. YURA	FM. LABRA
			GPO. YURA	FM. CACHÍOS

Figura 5.3: Unidades litoestratigráficas del área de estudio.

5.1.3.1 Estratigrafía

5.1.3.1.1 Mesozoico

- **Grupo Yura (Jurásico Medio – Cretácico Medio):** Corresponde a las rocas basales del área de estudio. La litología es variada, consistiendo de rocas siliciclásticas y carbonatadas de ambiente marino del Jurásico Medio-Cretácico Inferior (*Jenks, 1948; Benavides, 1962*). El Grupo Yura se encuentra infrayaciendo de manera casi concordante a la Formación Murco (Figura 5.4) y discordante al Grupo Puno y a la Formación Pichu. A lo largo del área de estudio se han observado afloramientos de las formaciones Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani.

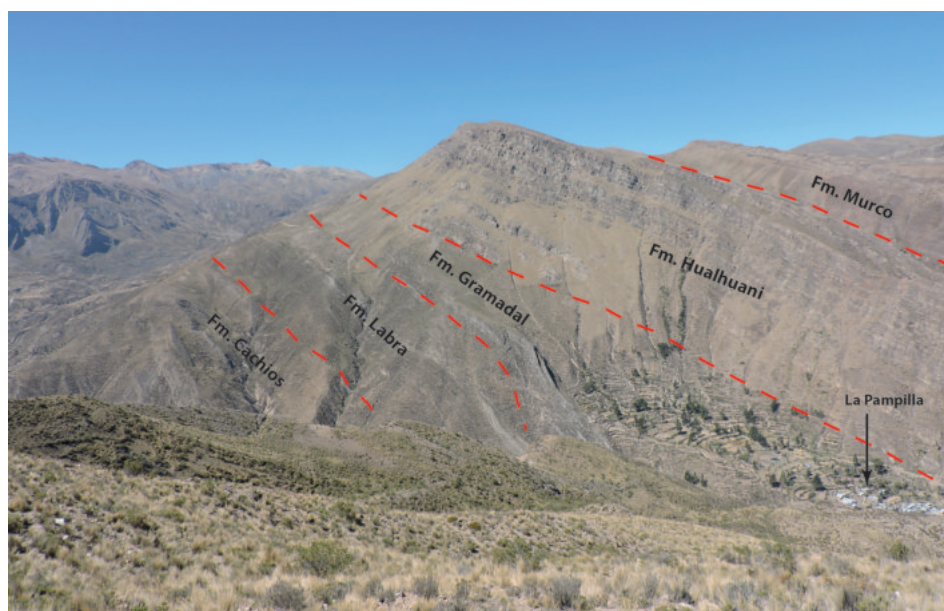


Figura 5.4: Contacto entre El Grupo Yura y la Formación Murco en cercanías del poblado La Pampilla, vista hacia el sureste.

- **Formación Cachíos (Jurásico Superior):** Descritas por *Jenks (1948); Benavides (1962)*. La litología consiste de una serie de lutitas con esporádicas intercalaciones de areniscas canalizadas, numerosos slumping y conglomerados intraformacionales arcillosos (*León, 1981*). En la localidad de Yunga se reconocen lutitas grises y negras intercaladas con delgados niveles de areniscas grises, infrayace concordantemente a la Formación Labra (*Lipa et al., 2001*).

Esta formación aflora entre las localidades de Ichuña, Antajahua, Yunga, La Pampilla, Patillane y Chaje; presenta lutitas negras deleznales con presencia en la base de nódulos calcáreos intercaladas con areniscas cuarzosas, esta secuencia ocasionalmente presenta deformación sin-sedimentaria (Slumps) (Figura 5.5) (*Cereceda et al., 2015*).

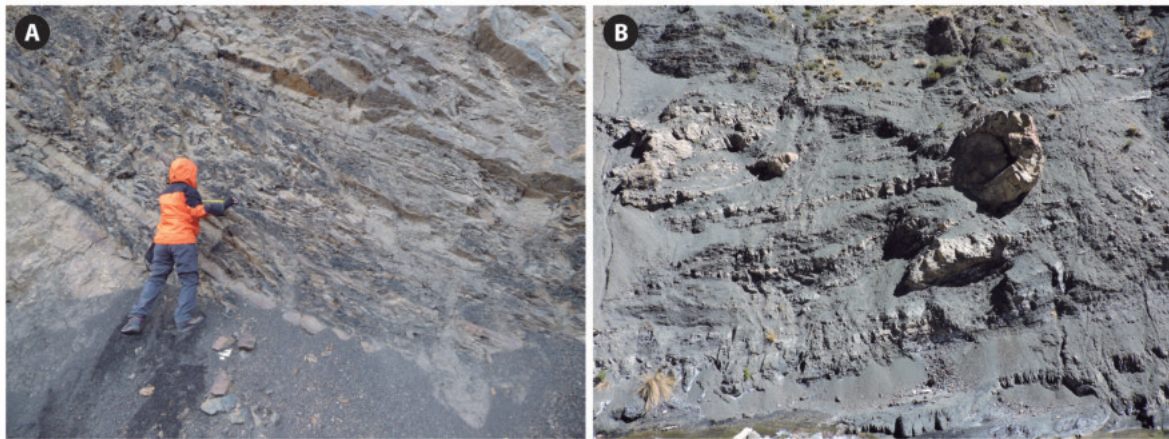


Figura 5.5: Rocas de la Formación Cachíos. A) Lutitas negras deleznales con nódulos calcáreos en los alrededores del poblado La Pampilla. B) Intercalaciones de lutitas negras con areniscas cuarzosas, esta secuencia presentan slumps, afloramiento ubicado en la quebrada del río Chaje.

- **Formación Labra (Jurásico Superior):** consiste de arenisca interestratificadas con menores proporciones de lutitas y escasa participación de margas y calizas (*Benavides, 1962*). Las lutitas grises y negras contienen nódulos esferoidales centimétricos, alternadas con areniscas grises, con estratificación paralela y cruzada; suprayace concordantemente sobre la Formación Cachíos (*Lipa et al., 2001*).

Esta Formación aflora en cercanías de los poblados Antajahua, Ichuña, Yunga, Chaje, Patillane, Pilliconi y Tocarongo; esta constituida por areniscas cuarzosas grises, gris blanquecinas y gris verdosa, además se presentan lutitas negras intercalas con las areniscas (Figura 5.6A) (*Cereceda et al., 2015*).

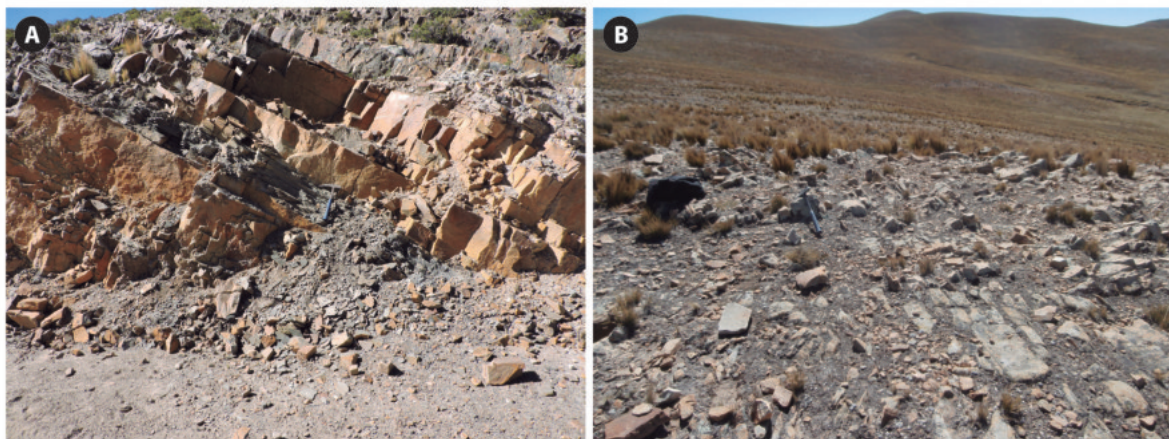


Figura 5.6: Rocas de la Formación Labra. A) Areniscas intercaladas con niveles de lutitas negras, afloramiento ubicado en cercanías del poblado Patillane. B) Areniscas cuarzosas, afloramiento ubicado en la quebrada Pasto Grande.

En los alrededores de Lagunillas afloran unas areniscas cuarzosas gris blanquecinas de grano grueso y presentan algunos óxidos que le dan una tonalidad rosácea (Fig. 5.6B). Esta unidad se encuentra infrayaciendo a unas secuencias calcáreas bioclásticas de la Formación Gramadal.

- **Formación Gramadal (Jurásico Superior – Cretácico Inferior):** Esta Formación ha sido identificada por *Jenks* (1948) y definido por *Benavides* (1962), quien señala como localidades tipo en las faldas orientales de los cerros Hualhuani y Labra (Arequipa). En la localidad de Yunga la litología consiste de calizas masivas grises fosilíferas con algunos niveles de dolomita y areniscas pardas hacia la base (*Lipa et al.*, 2001). La Formación Gramadal Suprayace de manera concordante a la Formación Labra e infrayace en la misma relación a la Formación Hualhuani.

En el área de estudio esta la Formación Gramadal está compuesta por calizas bioclásticas gris azulinas con presencia de gasterópodos, turritelas y bivalvos (Figura 5.7). La Formación Gramadal aflora en cercanías de los poblados Antajahua, Ichuña, Yunga, Chaje, Patillane, Pilliconi y Tocarongo.



Figura 5.7: Rocas de la Formación Gramadal. A) Afloramientos de calizas bioclásticas en la quebrada Pasto Grande. B) Calizas bioclásticas en cercanías del poblado Chaje.

- **Formación Hualhuani (Cretácico inferior):** Inicialmente estudiada por *Jenks* (1948), en el cuadrángulo de Arequipa y posteriormente por *Dávila* (1988). Consiste de cuarcitas blancas con laminación oblicua y paralela, intercaladas ocasionalmente con horizontes de lutitas negras carbonosas (*Lipa et al.*, 2001). La Formación Hualhuani suprayace de manera concordante a la Formación Gramadal.

En el área de estudio esta Formación consta de areniscas cuarzosas gris blanquecinas de grano grueso a medio (Figura 5.8), aflora en la cercanías de los poblados Antajahua, Ichuña, chaje, Yunga y Tocarongo.

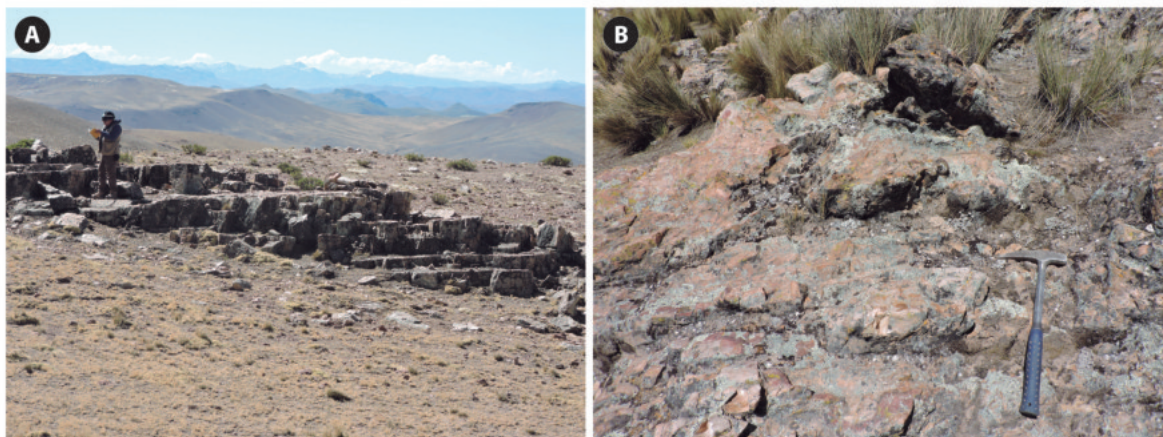


Figura 5.8: Areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani A) Afloramientos de areniscas en el cerro Yurac Orcco. B) Afloramientos de areniscas en el cerro Antacchura.

- **Formación Murco (Cretácico Inferior):** Denominada por *Jenks* (1948) y posteriormente *Benavides* (1962) establece la sección tipo en los parajes de Paccha y Sta. Rosa en el valle Sigwas, consiste de lutitas gris claro, púrpura claro, púrpura intenso y marrón, fácilmente delezna- bles, interestratificadas con pequeñas cantidades de areniscas blancas, gris claras o amarillo oscuras que intemperizan dando colores amarillentos claros y marrones; son de grano fino a mediano, en estratos fino hasta gruesos, ocasionalmente laminares, y con estratificación cru- zada. En las localidades de Pampilla y Exchaje, hacia la base es una secuencia de areniscas de color pardo rojizas con estratificación cruzada y paralela. En la parte superior las lutitas pardas, verdes a veces abigarradas se encuentran laminadas y fracturadas intercalándose con niveles de areniscas cuarzosas grises con laminaciones oblicuas (*Lipa et al.*, 2001).

En la zona de estudio esta Formación esta constituida por intercalaciones de areniscas rojizas de grano fino y limoarcillitas rojizas y gris verdosas con algunos niveles calcáreos (Figura 5.9). La Formación Murco descansa suprayace al Grupo Yura (Figura 5.4) y aflora en los alrededores de los poblados Yura, Exchaje y Antajahua.

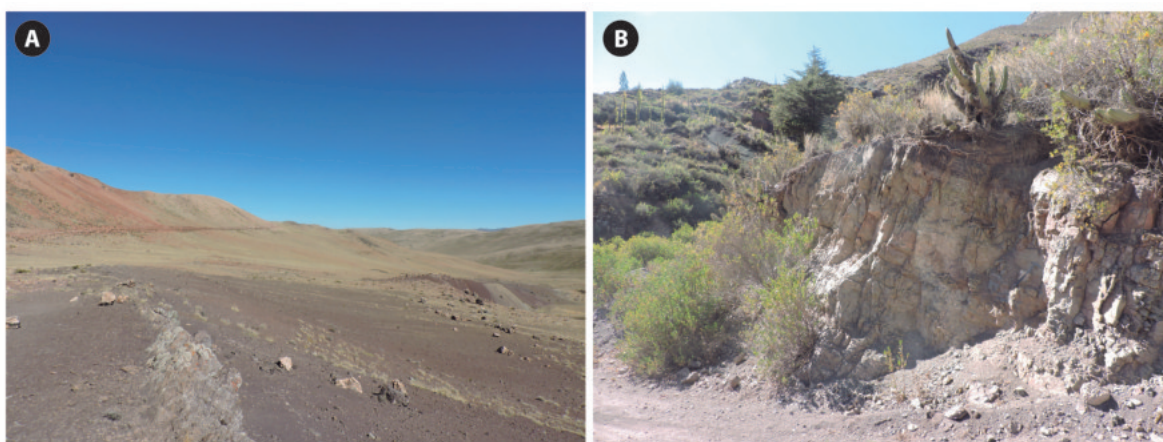


Figura 5.9: Afloramientos de la Formación Murco A) Afloramientos de areniscas en el cerro Yurac Orcco. B) Afloramientos de areniscas en el cerro Antacchura.

- **Formación Ayabacas (Cretácico inferior-Cretácico superior, Albiano-Cenomaniano):** Definida por *Cabrera y Petersen* (1936) en la localidad de Ayabacas, esta constituida por calizas y pelitas rojas. *Valdivia y Rodríguez* (2003) reconocen a esta Formación a lo largo del sistema de fallas Lagunillas y consideran que los olistolitos descritos por *Salas* (1984) corresponden a la Formación Ayabacas. En estudios más recientes, *Callot* (2008) indica que la Formación Ayabacas corresponde a una unidad resedimentada muy grande, resultando del colapso submarino de una plataforma carbonatada que se había desarrollado en la cuenca de trasarco sur-peruana; estas calizas se depositaron durante una primera transgresión en el Albiano y luego durante una segunda transgresión a partir del Cenomaniano terminal, finalmente el colapso Ayabacas se produjo al final de este segundo evento transgresivo, alrededor del límite Turoniano-Coniaciano.

En los alrededores de la laguna Saracocha, en los poblado Tocrunca, Achalaya, Tincopalca y Hacienda Toroya, se observan que la Formación esta constituida por calizas bioclásticas y pelitas rojas; se presenta en contactos irregulares con la Formación Saracocha y Formación Pichu (Figura 5.10).

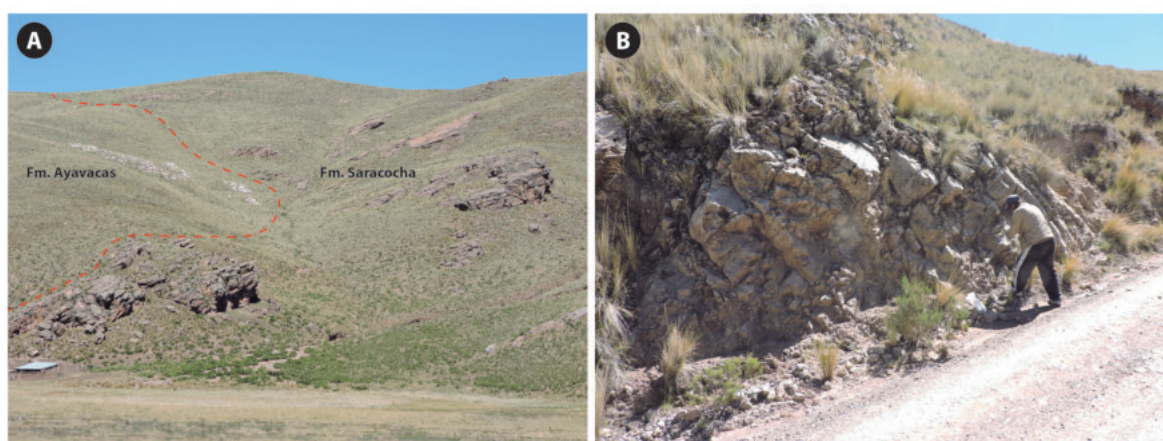


Figura 5.10: Afloramientos de la Formación Ayabacas A) Contacto irregular entre las Formaciones Ayabacas y Saracocha. B) Afloramientos de calizas en los alrededores del poblado Achalaya al sur de la laguna Saracocha.

5.1.3.1.2 Cenozoico

- **Grupo Puno (Paleoceno):** Fue reconocida por primera vez por *Gerth* (1915) como conglomerados y areniscas rojas; posteriormente *Cabrera y Petersen* (1936) le dan el rango de Formación Puno, y *Newell* (1949) la eleva a la categoría de grupo. El grupo Puno tipo está conformado por capas rojas, marrón violáceo y gris marrón de areniscas tufáceas, arcosas y conglomerados, dispuestos en discordancia angular sobre las secuencias Jurásico Cretácicas.

En el cuadrángulo de Ichuña, el Grupo Puno fue diferenciado en cuatro unidades: Conglomerado Ciguaya, Formación Pichu, Volcánico Tolapalca y Formación Quemillone (*Marocco y Del Pino*, 1966); en tanto que, en el área de Puno-Santa Lucía, los conglomerados de la base

del Grupo Puno fue denominado Formación Saracocha (Portugal, 1974). Lipa et al. (2001) en los trabajos de actualización consideran a los Conglomerados Ciguaya dentro del Grupo Puno, donde el Grupo Puno se encuentra sobre las rocas del Cretáceo y subyacen a la Formación Pichu.

A los alrededores e las localidad de Quinsachata y Quilcata, Cereceda et al. (2015), describen que el Grupo Puno está constituido en la base por conglomerados de clastos y matriz soportados de coloraciones rojizas, los clastos son de areniscas y calizas, y la matriz esta compuesta por areniscas y limoarcillitas (Fig. 5.11A); en el tope los conglomerados son matriz soporados, de coloración rojiza, y se presentan intercalados con areniscas de coloración rojiza en estratificaciones centimétricas, las areniscas son de grano medio a fino. El Grupo Puno infrayace en discordancia angular a la Formación Pichu.

En el los alrededores de las localidades Coalaque se han reconocido unas secuencias conglomeradicas polimícticas rojizas con clastos de areniscas cuarzosas y calizas, estos conglomerados se encuentran infrayaciendo a unas secuencias sedimentarias de la Formación Pichu; así también en la Quebrada Ciguaya afloran estos conglomerados infrayaciendo de manera discordante a unas secuencias sedimentarias fluviales de la Formación Pichu.

En los alrededores de Lagunillas aflora la Formación Saracocha compuesta por conglomerados polimícticos rojizos con clastos de areniscas cuarzosas y calizas (Fig. 5.11B).

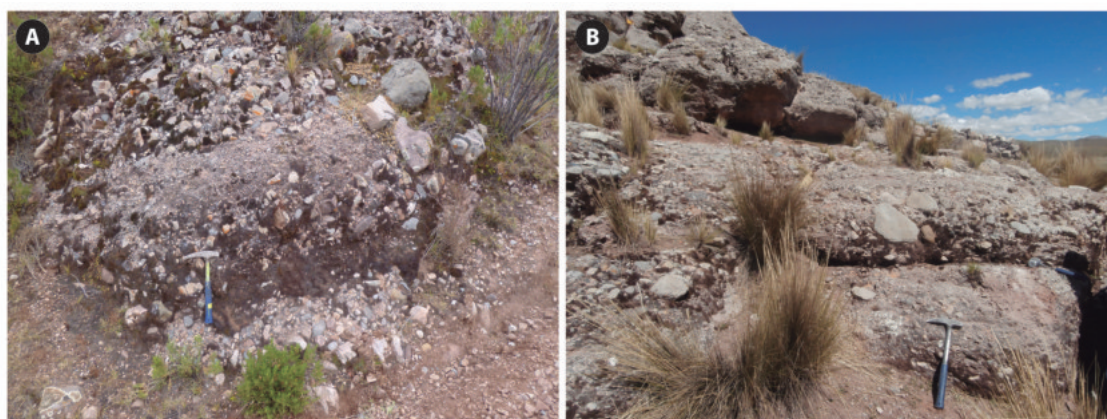


Figura 5.11: Afloramientos de la Formación Ayabacas A) Afloramientos de los conglomerados del Grupo Puno en la quebrada Janajhuyco, en cercanías de la localidad de Antajahua. B) Afloramientos de los conglomerados rojizos de la Formación Saracocha (Gpo. Puno) en la quebrada Pasto grande.

- **Formación Pichu (Paleoceno - Oligoceno inferior).** Definida por Marocco y Del Pino (1966), consiste en una alternancia de andesitas, areniscas gris verdosas, conglomerados con clastos volcánicos y piroclastos; la presencia de las rocas volcánicas varía con respecto a los sedimentos y por lo general tienen un aspecto lenticular, ocasionado un cambio litológico en distancias cortas.

Al norte de Yanahuara en el cerro Hurmanayo, afloran una gruesa secuencia de areniscas microconglomerádicas masivas de color verde y rocas andesíticas. La Formación Pichu descansa en discordancia angular sobre el Grupo Yura (*Lipa et al.*, 2001).

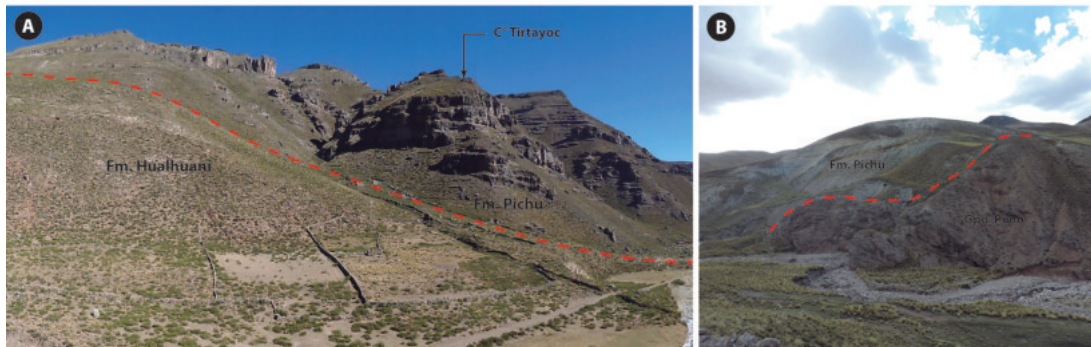


Figura 5.12: A) Contacto en discordancia angular de las areniscas cuarzosas de la Formación Hualhuani y las rocas volcánicas lávicas de la Formación Pichu, vista hacia el noroeste. B) contacto en discordancia angular de los conglomerados del Grupo Puno y las areniscas gris verdosas de la Formación Pichu.

- **Grupo Tacaza (Oligoceno inferior - Oligoceno superior).** *Newell* (1949) describió por primera vez a unos potentes niveles de rocas volcánicas en las proximidades de la mina Tacaza, y lo denominó Volcánicos Tacaza. *Wasteneys* (1991) describió la sección tipo del Grupo Tacaza en los alrededores de la mina Tacaza, haciendo uso de dataciones enmarcó este evento volcánico en 23.5-30 Ma. Esta Unidad aflora en la hoja de Lagunillas, Ichuña y Pichacani. El Grupo Tacaza está conformado por una serie volcánica andesítica básica y clástica con niveles piroclásticos.

Las rocas del Grupo Tacaza afloran en los alrededores de las localidades Quemillone, Ichuña, Jesús María, Chaupichura y Lagunillas y esta compuesta por una serie volcánica lávica y piroclástica (Fig. 5.13); el Grupo Tacaza se encuentra sobreyaciendo a la Formación Pichu e infrayaciendo al Grupo Maure.

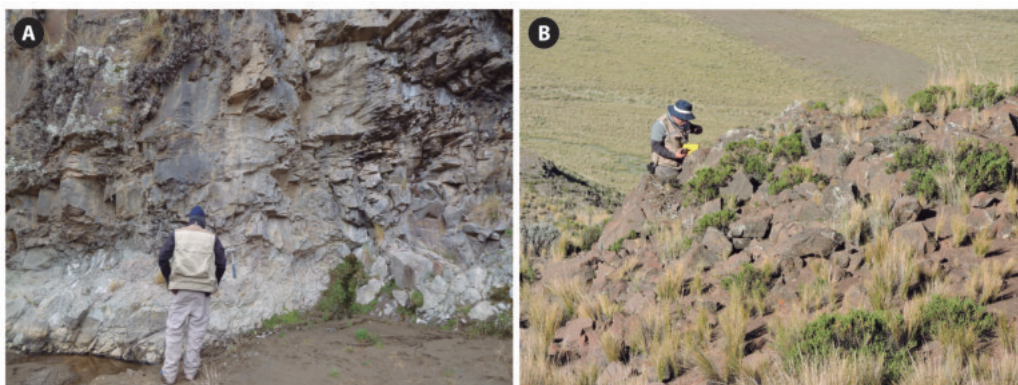


Figura 5.13: A) Afloramiento de andesitas porfíricas, afloramiento ubicado a los alrededores del poblado Jesús María. B) Toba rica en cristales pertenecientes al Grupo Tacaza, carretera Santa Lucía-Lagunillas.

- **Grupo Maure (Mioceno).** El término Formación Maure fue introducido por primera vez por *García* (1978) para definir a una secuencia de sedimentos y piroclásticas post-Grupo Tacaza, en el área de Palca en el sur del Perú.

El grupo Maure en el cuadrángulo de Ichuña está constituido por secuencias sedimentarias intercalada con depósitos continentales lacustrinos, conglomerados y coladas de lava andesíticas; se establecen dos unidades bien diferenciables, la unidad inferior compuesta por lutitas grises, areniscas beige, calizas pardas, areniscas tobáceas verdes claras y niveles conglomerádicos de matriz arenosa; la unidad superior corresponde a lavas andesíticas grises parcialmente fluidales, que se interdigitan en medio de esta secuencia clástica, separando los depósitos clásticos finos de los conglomerádicos (*Lipa et al.*, 2001).

Valdivia y Rodríguez (2003), en el cuadrángulo de Lagunillas, consideran que el Grupo Maure comprende niveles sedimentarios, niveles de tobas riolíticas y lavas andesíticas.

Cuellar (2001), en la parte SE del cuadrángulo de Pichacani reconoce al Grupo Maure como una secuencia volcánica-sedimentaria de 1150m de espesor y reconoce cinco miembros:

-Miembro A: presenta tobas retransportadas con clastos de granos finos a gruesos de coloración verdosa; intercaladas con tobas consolidadas de composición volcánica compuesta por pómez, biotita y fragmentos líticos, a su vez intercaladas con estratos de lutitas violáceas. Hacia la parte intermedia y superior se muestran estratos de calizas grises de grano fino. Presenta una secuencia vertical grano-estrato creciente y tiene aproximadamente 250m de grosor.

-Miembro B: la parte inferior está constituida por canales y clastos subangulosos a subredondeados con imbricaciones; suprayaciendo a este nivel encontramos tobas retransportadas de coloraciones verde claras, grises y blancas, con tamaños de grano grueso a fino e intercaladas con estratos de calizas de aproximadamente 30cm. y con estratos de microconglomerados de clastos separados y matriz tobácea; finalmente se encuentra un estrato de lutitas rojas y un paquete de tobas retransportadas amarillas contenido plagioclasas y biotitas, constituyen los últimos 20m de este miembro. Presenta una evolución vertical grano-decreciente y un espesor aproximado de 400m.

-Miembro C: descansa concordante sobre el miembro B. Está representado por un paquete de tobas soldadas de color blanco amarillento, la cual está contenida por biotita, cuarzo, pómez y feldespatos; presenta un espesor de 47m.

-Miembro D: contiene en la parte basal e intermedia tobas retransportadas soldadas y no soldadas de coloraciones verdes a blancas intercaladas con algunos estratos de conglomerados con clastos angulosos y subredondeados de origen volcánicos con espesores menores a 1m, presentan también laminaciones horizontales y oblicuas planas; la parte superior está conformada por lutitas compactas de color verde; presenta un espesor de 240m y una evolución vertical grano-decreciente.

-Miembro E: con aproximadamente 215m de grosor, presenta hacia la base intercalaciones de tobas retrabajadas blancas, verdes y amarillentas con laminaciones oblicuas planas y canales de microconglomerados de color marrón rojizo; suprayaciendo a este nivel se tiene una colada volcánica verde oscura fanerítica de 8m de espesor y bastante alterada; posteriormente se tiene una secuencia de tobas retrabajadas no soldadas de coloraciones blancas, rosadas y verdes que se encuentran intercalas con niveles calcáreos de color gris blanquecino a marrón claras.

En el sector de Lagunillas se encuentra suprayaciendo a los volcánicos Carayccasa, (datadas en roca total K/Ar $21,7 \pm 0.5$ Ma por *Bellon y Lefèvre* (1976)) teniendo de edad su límite inferior al inicio del Mioceno, en la localidad de Huacochullo, al oeste del Cerro Japasaira (Pichacani) *Klinck et al.* (1986) realiza dataciones en muestras de lavas del Grupo Maure datadas por K/Ar dando edades de 8.0 ± 0.4 Ma y 8.8 ± 0.4 Ma y una muestra datada por roca total dando una edad de 10.3 ± 0.4 Ma, asociada a las dataciones realizadas a lavas andesíticas en la represa de Condoroma (12 Ma) en donde el Grupo Maure infrayace a una ignimbrita (*Torres*, 2011) datada en K/Ar (biotita) 4.92 ± 0.16 Ma por *Carlotto et al.* (2002).

El Grupo Maure aflora en gran parte de la zona de estudio y consta de una secuencia sedimentaria lacustrina con intervención volcánica (Fig. 5.14) posterior al vulcanismo Oligocénico (Gpo. Tacaza). El Grupo Maure aflora en los alrededores de Santa Lucía, Tincopalca, Toroya, Hacienda Toroya, Hacienda Icshuya, Cachipascana, Yalagua y Chojata.

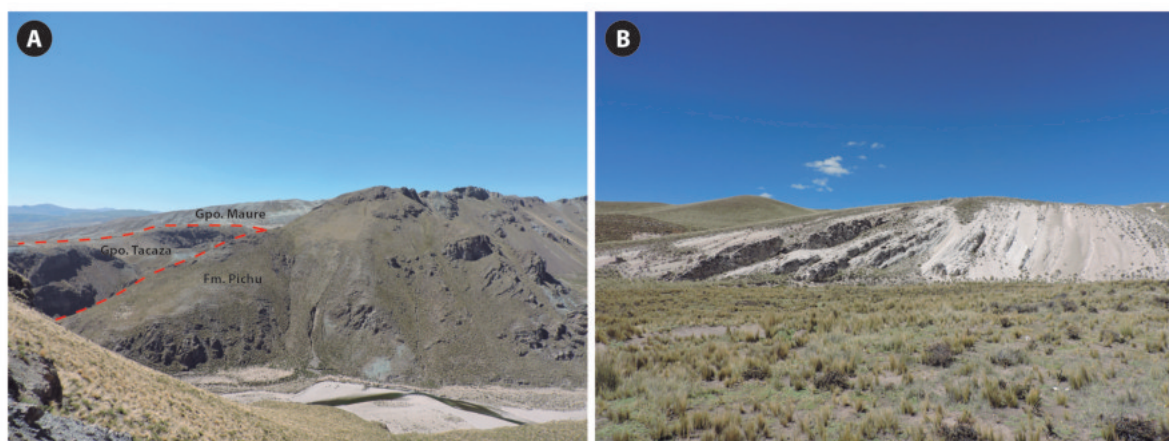


Figura 5.14: A) Relaciones de contacto entre depósitos volcánicos-sedimentarios del Gpo. Maure, rocas volcánicas del Gpo. Tacaza y las secuencias volcánicas-sedimentarias de la Fm. Pichu; foto tomada desde el cerro Tucuyraña. B) Discordancias progresivas en las secuencias volcánicas-sedimentarias del Gpo. Maure

- **Grupo Sillapaca (Mioceno).** El término se ha derivado de la cordillera sillapaca al Noroeste del cuadrángulo de lagunillas, denominado por *Jenks* (1948) y *Newell* (1949) usando ambos el nombre de volcánicos Sillapaca y Grupo Sillapaca; posteriormente *Portugal* (1974) introduce el término formación Sillapaca a las rocas volcánicas ubicadas a lo largo de la cordillera.

Aflora en la parte norte-central del cuadrángulo de Lagunillas; en la localidad tipo el complejo volcánico Sillapaca consiste de flujos lávicos de composición andesítica y dacítica; la morfología de la estructura muestra varios niveles de flujos lávicos, algunos de ellos están parcialmente erosionados. Las coladas lávicas más jóvenes muestran dirección de flujo, siendo algunos típicos de domos lava de composición dacítica; las rocas lávicas sobreyacen en aparente concordancia a las ignimbritas del Grupo Palca, esta última se considerada coetánea al Grupo Maure (*Valdivia y Rodríguez*, 2003).

Remigio (2012), en los alrededores de Ichuña, considera que el Grupo Sillapaca esta representado por el complejo volcánico Chucapaca por encontrarse dentro del rango de edades del Grupo Sillapaca; las lavas del complejo volcánico Chucapaca es un complejo de domos de lavas de composición riolítica y de reducidos afloramientos de depósitos de flujos de bloques y cenizas.

- **Formación Llallahui (Mioceno).** Litológicamente consiste de piroclastos de tipo riodacítico con intercalaciones de flujos lávicos porfíricos a afíricos de composición andesítica de color gris verdosos, aglomerados y brechas volcánicas.

Sobreyace en discordancia erosional a las unidades Precambrianas (complejo Basal de la Costa) y Mesozoicas (Grupo Yura y Formación Matalaque) infrayaciendo en la misma relación a las unidades del Plioceno-Pleistoceno (*Quispesivana y Zapata*, 2000).

Conformada por una secuencia de lavas andesíticas y tobas. Afloran ampliamente en el cuadrángulo de Ichuña, siendo reconocida en las localidades de la hacienda Matazo y cerro Llallahui donde está su localidad tipo; se evidencian dos unidades en esta formación: la unidad superior conformada por una secuencia de lavas andesíticas que yacen sobre tobas brechoides blanquesinas; la unidad basal está conformada por tobas de cristales de matriz afanítica, la unidad basal han sido reconocidas al sureste de la hoja de Ichuña siendo cubiertas por lavas andesíticas (*Lipa et al.*, 2001).

- **Grupo Barroso (Plioceno).**

Definida por *García* (1978) como Formación Barroso, designada como área típica la Cordillera del Barroso en el cuadrángulo de Palca. Posteriormente *Mendivil* (1965), lo eleva a la categoría de Grupo, dividiéndolo en tres unidades de abajo hacia arriba como son: volcánico Chila, Barroso y Purupurine.

Lipa et al. (2001) en el Cuadrángulo de Ichuña describe rocas andesíticas e ignimbritas, tomando en consideración los centros de emisión y su naturaleza litológica hace una separación

morfoestructural.

Quispesivana y Zapata (2000) en el cuadrángulo de Omate diferencia a los depósitos volcánicos mas recientes en un aspecto lito-morfoestructural en complejos y aparatos volcánicos. En el cuadrángulo de Lagunillas *Valdivia y Rodríguez* (2003) describen lavas andesíticas porfíricas gris oscuras y las agrupan según morfoestructuras (Estrato volcán Condori y la estructura Chila).

5.1.3.2 Rocas intrusivas

En el área de estudio afloran cuerpos intrusivos plutónicos y subvolcánicos, los cuales varían en extensión y distribución.

5.1.3.2.1 Intrusivos plutónicos:

- En la hoja de Omate (34-u), *Quispesivana y Zapata* (2000) describe cuerpos plutónicos de la Superunidad Yarabamba en forma de stock y apófisis se encuentran intruyendo unidades pertenecientes al Mesozoico, peculiarmente a la Formación Matalaque. Litológicamente están constituidos por rocas ácidas a intermedias como granodioritas, cuarzo monzodioritas cuarcíferas, dioritas y tonalitas; las cuarzo monzodioritas son las más características, formando afloramientos aislados. Entre las localidades de Muilaque y Candahua los afloramientos tienen forma de un stock alargado de dirección SSE - NNO, este cuerpo se encuentra intruyendo a la Formación Matalaque; en el sector de Yaral la Formación Matalaque se encuentra intruido por pequeños apófisis.
- En la hoja de Ichuña (33-u), *Lipa et al.* (2001) al sur de la hoja, en la localidad de Chujilaque, reconoce un cuerpo intrusivo de granodiorita de forma semi-circular cuya superficie cubre 25 Km; este cuerpo intruye a la Formación Matalaque, Grupo Tacaza y Grupo Maure; es asociado al Paleógeno-Neógeno.

5.1.3.2.2 Intrusivos subvolcánicos:

- En la hoja de Omate (34-u), *Quispesivana y Zapata* (2000) describe cuerpos subvolcánicos que se encuentran en afloramientos restringidos y aislados en el sector de Yaral; estos cuerpos son mayormente de composición intermedia, litológicamente corresponden a andesitas porfíricas que intruyen a la secuencia volcanoclástica de la Formación Matalaque en forma dispersa.
- En la hoja de Lagunillas (32-u), *Valdivia y Rodríguez* (2003) describe unos cuerpos subvolcánicos que afloran en el cerro Jurapunco y en el sector Colquerane. El cuerpo subvolcánico Jurapunco consiste de andesitas de textura porfírica, este cuerpo es asociado al Paleógeno; el cuerpo subvolcánico Colquerane consiste de un pórfido andesita con morfología típicas de extrusiones cóncavas, este cuerpo es asociado al Neógeno.

- En la hoja de Ichuña (33-u), *Lipa et al.* (2001) reconoce numerosos afloramientos de pórfidos subvolcánicos en forma de diques, sills y stocks de dimensiones variables; la composición de estos pórfidos consiste en su mayoría de riolitas que afloran al sur de la localidad de Paiti y noroeste de la localidad de Tassa; las rocas andesíticas afloran en las localidades de Ichuña y en cercanías de la Lloque; las microdioritas afloran al norte de Yalagua; las latitas afloran en la quebrada Pataque. Estos cuerpos subvolcánicos pertenecen al Paleógeno-Neógeno.
- En la hoja de Pichacani (33-v), afloran cuerpos subvolcánicos del Paleógeno-Neógeno. El cuerpo de pórfido andesítico aflora en las cercanías del proyecto minero Chucapaca, y el cuerpo pórfido diorítico aflora en las cercanías del proyecto minero San Antonio de Esquilache.

5.1.3.3 Geología estructural

Regionalmente el área de estudio esta limitada hacia el noreste por el sistema de fallas Cusco-Lagunillas-Mañazo y hacia a el Suroeste por el sistema de fallas Alto Condoroma-Caylloma, estos sistemas de fallas delimitan los dominios geotectónicos de la Cordillera Occidental y el Alto Condoroma Caylloma (Fig. 5.15).

En el área de estudio fueron reconocidas principalmente dos zonas estructurales (Fig. 5.2):

- **Zona centro:** La estructura dominante en esta zona es el anticlinal de Yunga, el eje de pliegue posee una orientación NO-SE. Este pliegue es producto de la deformación durante el Cretáceo superior (evento Peruano), la cual expuso a las unidades Jurásicas y Cretácicas a erosión (*Ellison et al.*, 1989).

A los alrededores de esta estructura con orientación NO-SE se reconocen lineamientos, fallas inversas de bajo ángulo y pliegues con la misma orientación. Así tambien se reconocieron fallas de rumbo dextral y lineamientos con orientación NE-SO.

- **Zona noroeste:** La estructura dominante en esta zona con orientacion NO-SE es la Falla Toroya, la cual es una falla de rumbo sinistral con componente normal. En cercanías a esta falla se encuentran pliegues que conservan la misma orientación que la Falla Toroya y cuanto más cercanos están a dicha falla son más apretados (*Rodríguez et al.*, 2002). Estas estructuras afectan unidades volcánicas y sedimentarias del Mioceno.

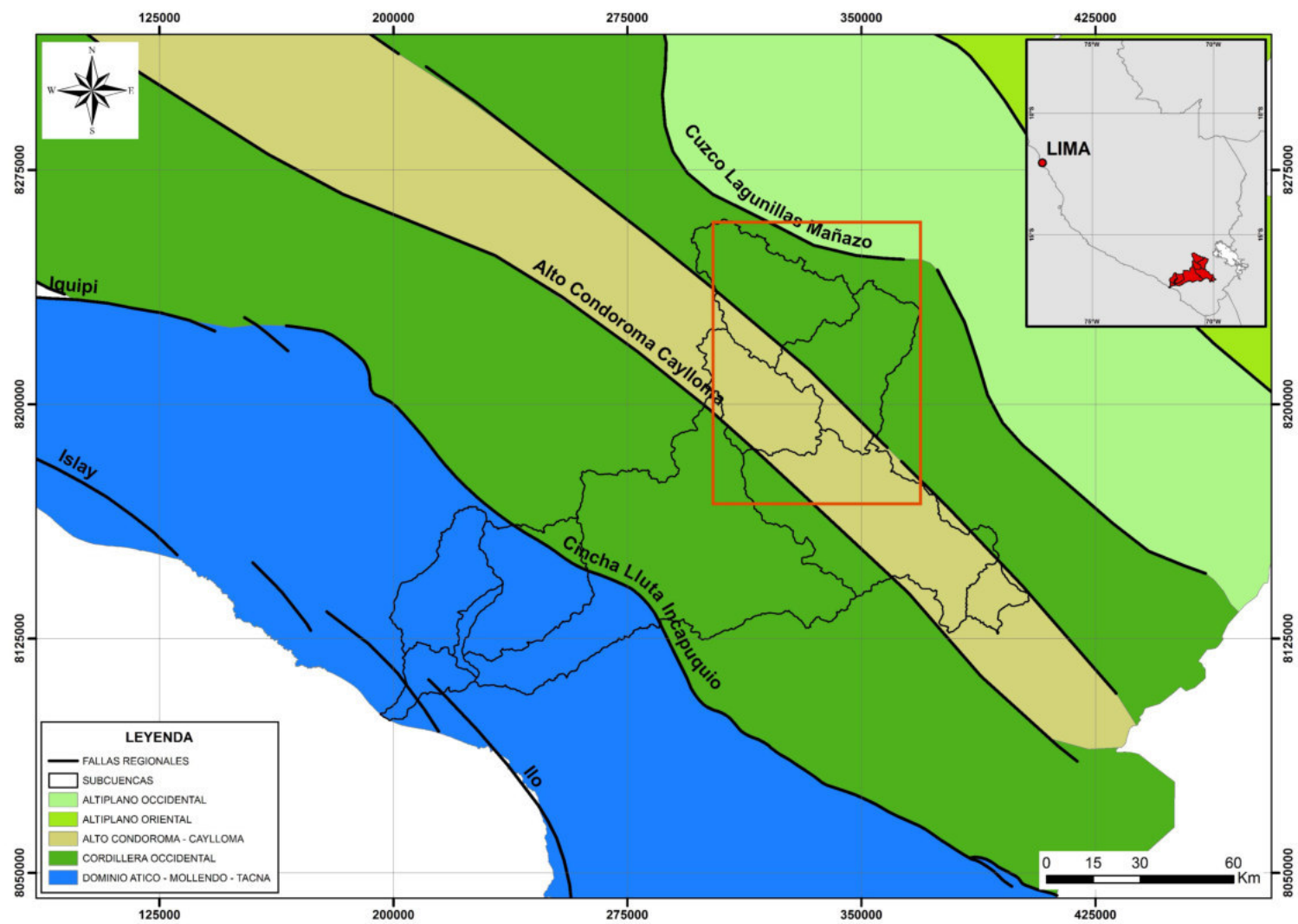


Figura 5.15: Mapa de unidades morfoestructurales del área de estudio.

5.1.3.4 Geología económica

El área de estudio esta enmarcada en la franja de Pórfidos-Skarn de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusivos del Eoceno-Oligoceno, la franja de Depósitos polimetálicos Pb-Zn-Cu con superposición epitermal de Au-Ag, y la franja de epitermales de Au-Ag del Mioceno (Acosta *et al.*, 2014).

Dentro del área de estudio están presentes proyectos mineros metálicos de importancia, los depósitos presentes en los alrededores del área de estudio son depósitos tipo pórfido de Cu-Au (Pinaya), epitermales de alta sulfuración (San Gabriel, Chapi Chiara), vetas polimetálicas (San Antonio de Esquilache, Conchopata, Virgen de Chapi, Santa Bárbara y Tres Marías) y otras pequeñas ocurrencias registradas a los alrededores.

En los alrededores de Ichuña también afloran depósitos de carbón (Oyo Oyo y Pobaya) asociado a unidades Mesozoicas

Capítulo 6

Análisis sedimentológico de la Formación Pichu

En el área de estudio se realizó un cartografiado tomando en cuenta las unidades volcánicas y sedimentarias del Eoceno-Oligoceno, para esto se registraron 11 columnas estratigráficas levantadas en el cerro Llapapata, Totorani, Quemillone, Catosive, Antajahua, quebrada Chahuana, Jesús María, quebrada Jachata, quebrada Ciguaya y puente Coralaque (Figura 6.1). Estas columnas permitieron diferenciar la Formación Pichu en los miembros A, B, C y D (Figura 6.2).

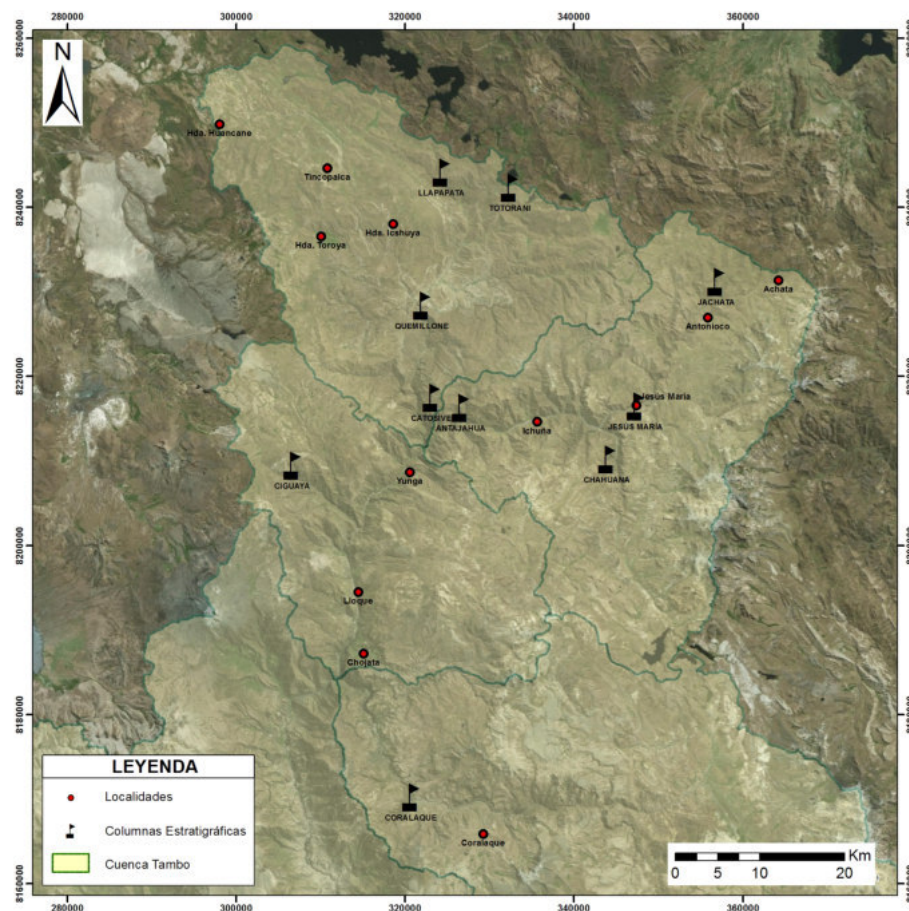


Figura 6.1: Mapa de ubicación de las columnas estratigráficas.

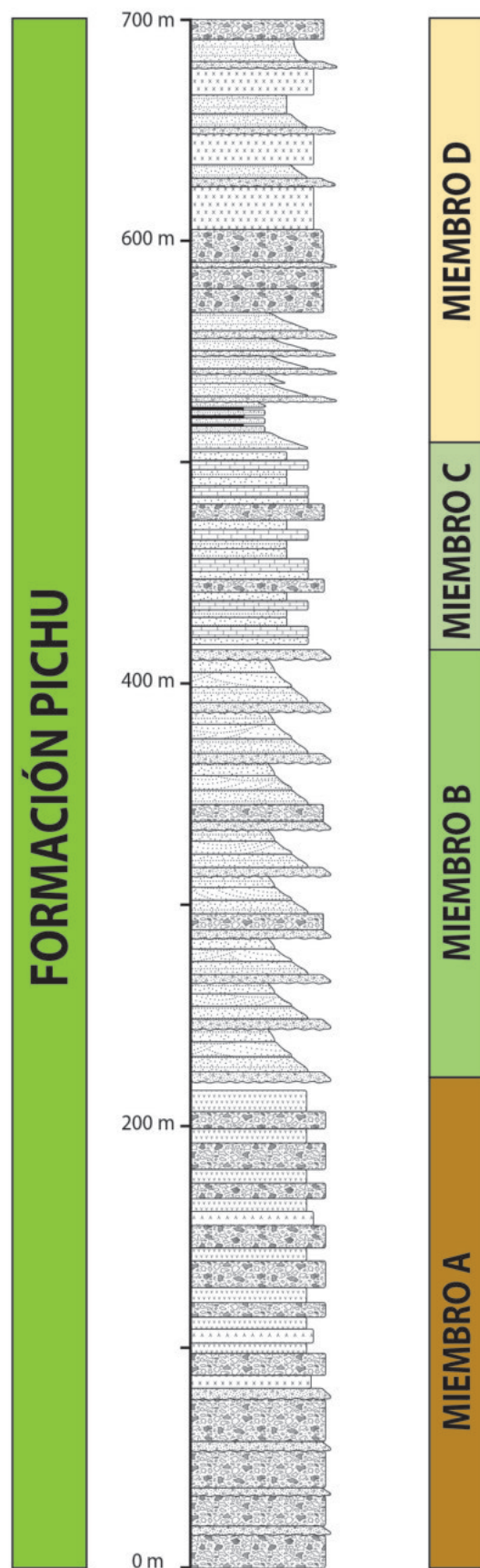


Figura 6.2: Columna estratigráfica compilada de la Formación Pichu.

6.1 Miembro A

Corresponde a la parte inferior de la Formación Pichu la cual se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular a los conglomerados del Grupo Puno e infrayace al Miembro B, aflora en los alrededores de Ichuña, Jesús María, Antonioco y Zorichata. Esta compuesto de aproximadamente

200m de rocas volcánicas, en la secuencia se presentan tobas, aglomerados, andesitas y basal-
tos; en ciertas ocasiones se encuentran intercalaciones de niveles sedimentarios constituidos por
conglomerados y areniscas.

6.1.1 Columna Jachata

Localizada en la margen derecha del río Jachata cerca de la localidad de Zorichata. Los estratos se encuentran buzando ligeramente hacia el norte.

La columna estratigráfica Jachata (Figura 6.3) presenta una sucesión de brechas monolíticas intercaladas con rocas andesíticas, rocas basálticas y que ocasionalmente se presentan en forma de lentes, brechas piroclásticas y tobas brechas (Figura 6.4).

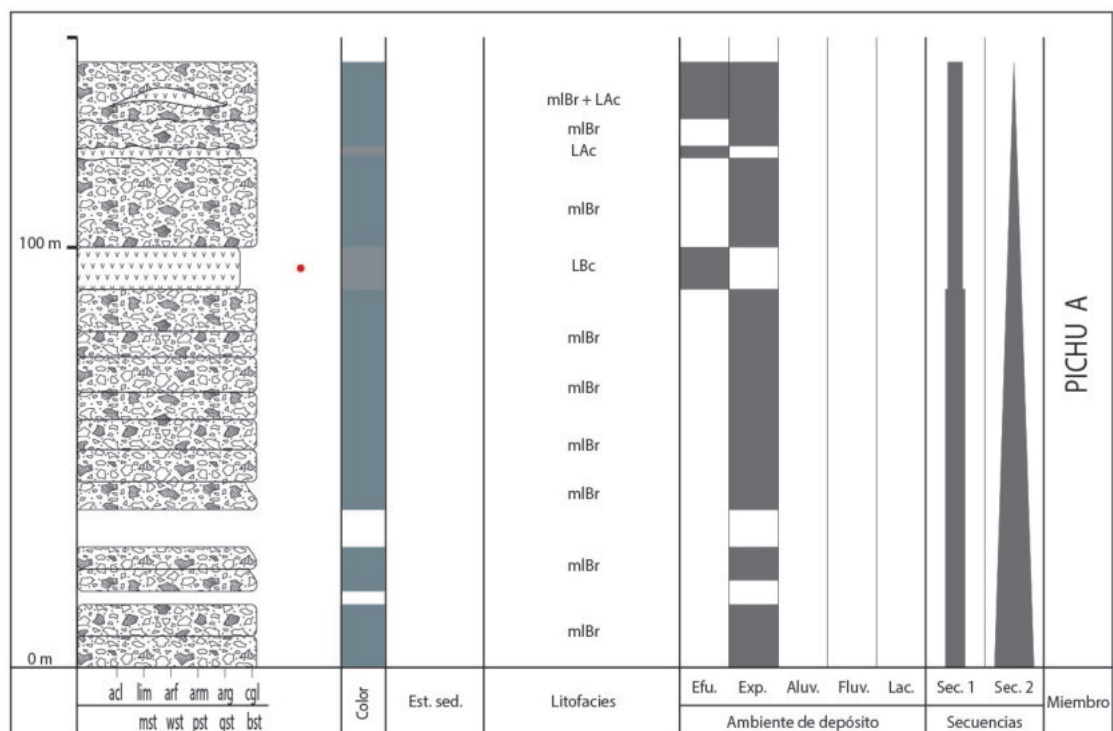


Figura 6.3: Columna estratigráfica que muestra parte del Miembro A de la Formación Pichu en el margen derecho del río Jachata.

Las litofacies que han sido identificadas son mlBr, LBc, LAc y mlBr + LAc (Figura 6.4), estas facies evidencian el vulcanismo efusivo y explosivo.

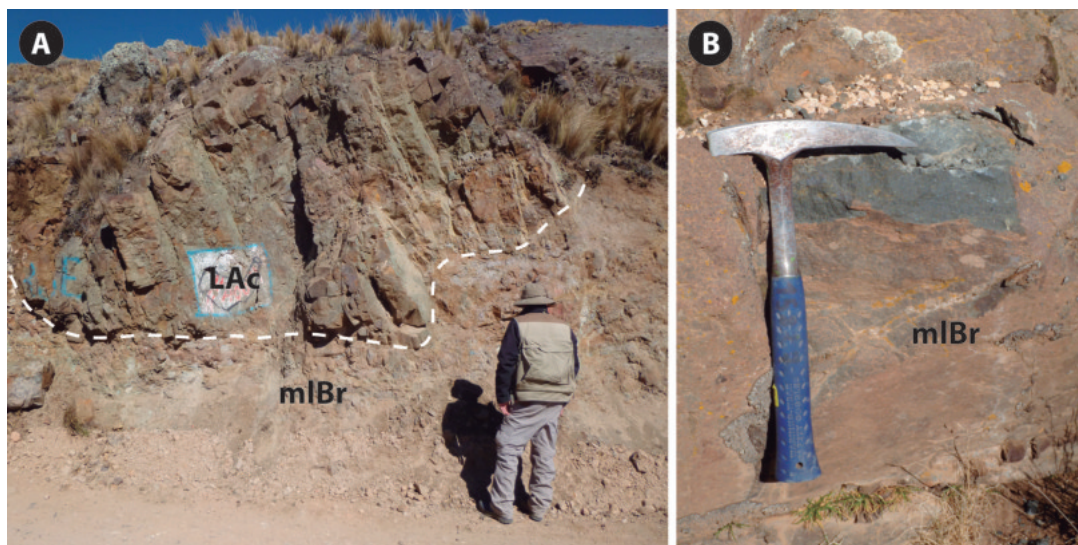


Figura 6.4: Litofacies de la columna Jachata. A) Lavas andesíticas y tobas-brechas. B) Detalle de clasto andesítico en una toba-brecha.

6.1.2 Columna Jesús María

Localizada entre los poblados de Jesús María, Pacchi Chico, Huancune y Crucero (Figura 6.5). Los estratos se encuentran buzando ligeramente hacia el norte.



Figura 6.5: Contacto entre los Miembros A y B, vista hacia el Norte desde el pueblo Huancune.

El Miembro A de la Formación Pichu esta representado en los primeros 60m de la columna estratigráfica Jesús María (Figura 6.6). Las rocas presentes en la parte basal de la columna constan de rocas andesíticas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos alterados a óxidos, y brechas piroclásticas con clastos ángulosos de variada composición y con una matriz piroclástica compuesta por cristales de plagioclasa y biotita.

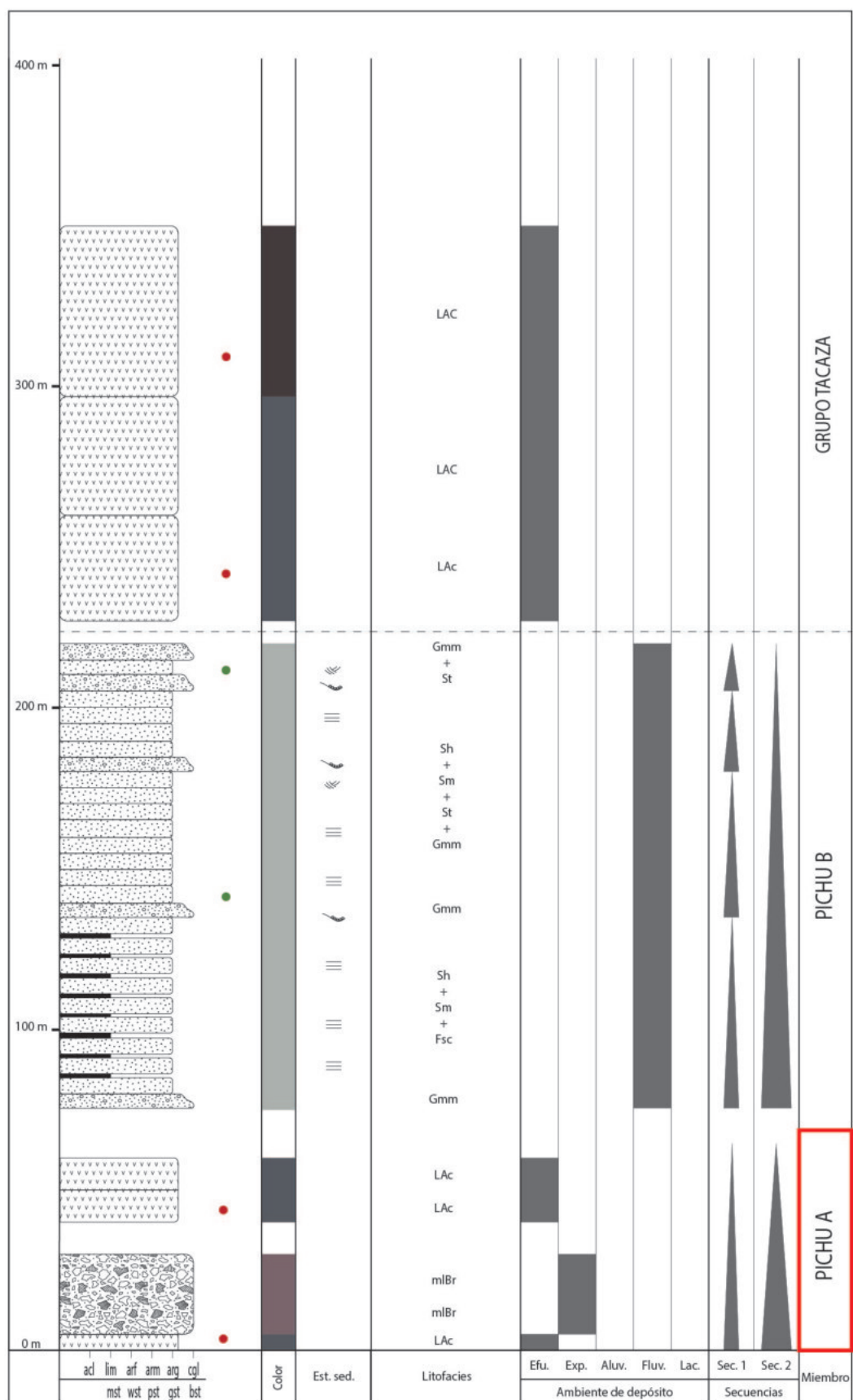


Figura 6.6: Columna estratigráfica que muestra la parte superior del Miembro A de la Formación Pichu en cercanías de la localidad de Jesús María.

Las litofacies que han sido identificadas son LAc y mlBr (Figura 6.7), evidenciando la alternancia de vulcanismo explosivo y efusivo.



Figura 6.7: Litofacies de la columna Jesús María. A) Brecha piroclástica; B) Andesita porfírica coherente

6.1.3 Columna Chahuana

Esta columna estratigráfica está localizada en la quebrada Chahuana y en los alrededores del cerro Tintayoc y el poblado Pujro Pujro (Figura 6.8) hacia el suroeste de la localidad de Jesús María.



Figura 6.8: Afloramientos del Miembro A en el cerro Tintayoc, vista hacia el Sur.

El Miembro A de la Formación Pichu está representada por aproximadamente 250m de rocas volcánicas (Figura 6.9) y se encuentra infrayaciendo al Grupo Tacaza. La secuencia está constituida desde la base por una alternancia de brechas piroclásticas de clastos heterogéneos menores a 50cm, andesitas violáceas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas y con algunos óxidos de cobre, brechas con clastos de composición andesítica menores a 30cm, andesitas gris

violáceas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas orientadas y biotitas, también con epidotas y óxidos de hierro. De manera concordante se encuentra una secuencia de coloración rojiza contituida por areniscas de grano fino a medio con laminaciones horizontales intercaladas con limolitas y lutitas de coloración rojiza, le siguen intercalaciones de andesitas afíricas y brechas monolíticas andesíticas gris rojizas con clastos menores a 10cm (Figura 6.10).

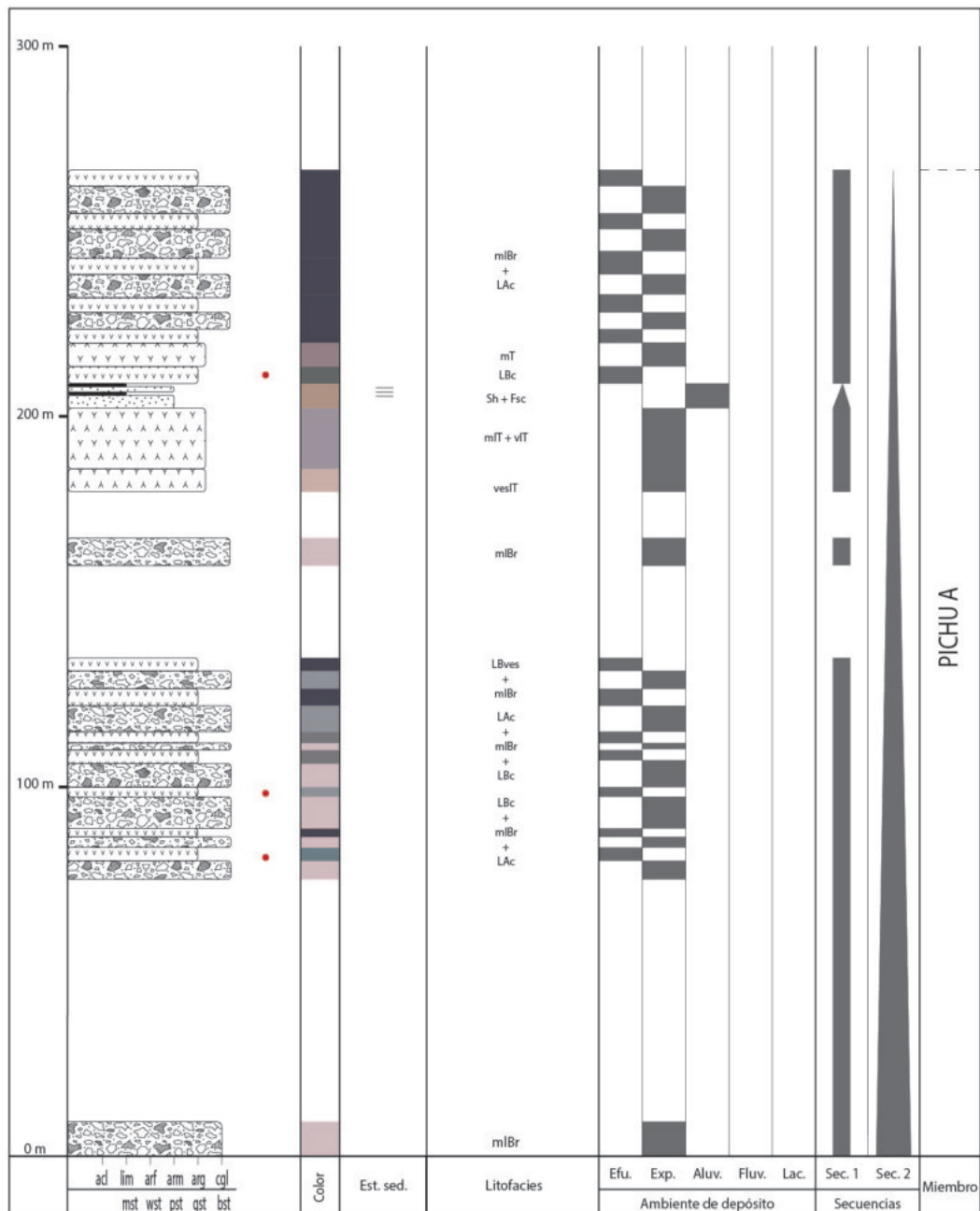


Figura 6.9: Columna estratigráfica que muestra el Miembro A de la Formación Pichu en la quebrada Chahuana.

Las litofacies que han sido identificadas son mlBr, LAc, LBc, LBves, veslT, mlT, vIT, Sh, Fsc, mT (Figura 6.10). Estas facies evidencian la alternancia de un vulcanismo explosivo y efusivo interrumpida tal vez por un episodio aluvial.

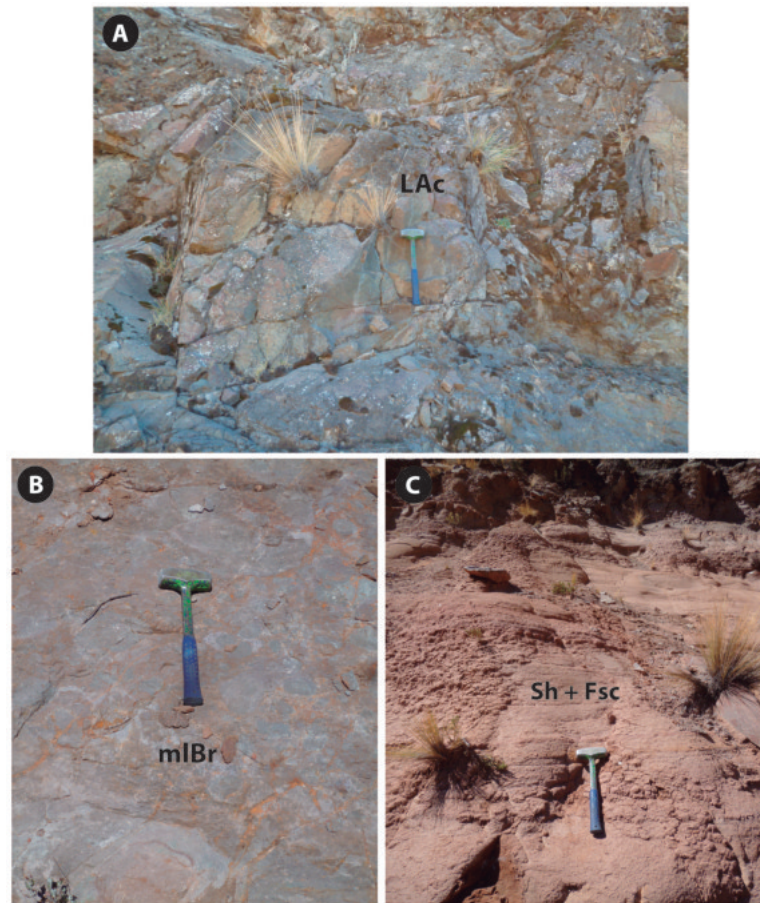


Figura 6.10: Litofacies del Miembro A de la columna Chahuana. A) Andesitas porfíricas con fenocristales de plagioclasas. B) Brechas monolíticas andesíticas. C) Areniscas con laminaciones horizontales intercalada con limolitas.

6.1.4 Columna Antajahua

Localizada en la quebrada Janajhuico y el cerro Quinsachata (Figura 6.11), en las cercanías del poblado Antajahua y Quilcata. El Miembro A se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular a los conglomerados rojizos del Grupo Puno e infrayaciendo al Miembro B de la Formación Pichu.



Figura 6.11: Contacto entre la Formación Pichu y los conglomerados del Grupo Puno, vista hacia el sureste.

La secuencia esta constituida de aproximadamente 80m de rocas volcánicas en la columna estratigráfica Antajahua (Figura 6.12). Las rocas volcánicas constan de andesitas porfíricas intercaladas con tobas brechas con clastos de composición andesítica gris verdosos y tobas brechas de clastos volcánicos heterogeneos gris violáceos.

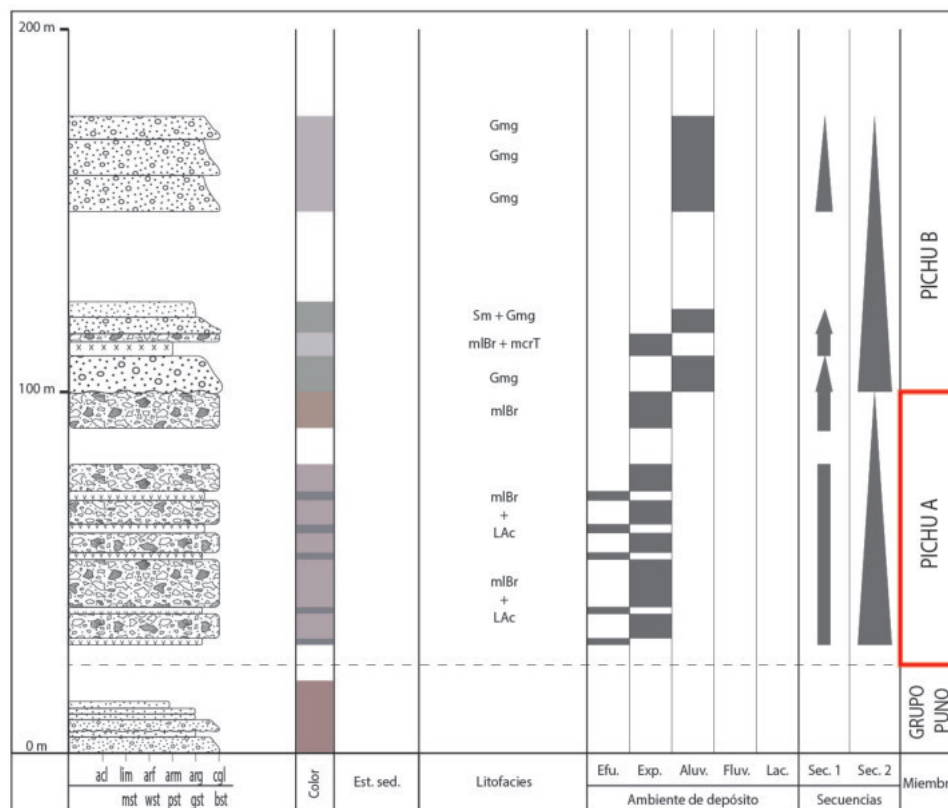


Figura 6.12: Columna estratigráfica que muestra el Miembro A de la Formación Pichu en los alrededores de Antajahua.

Las litofacies identificadas son LAc y mlBr (Figura 6.13). Estas facies evidencian la alternancia de vulcanismo explosivo y efusivo del Miembro A.

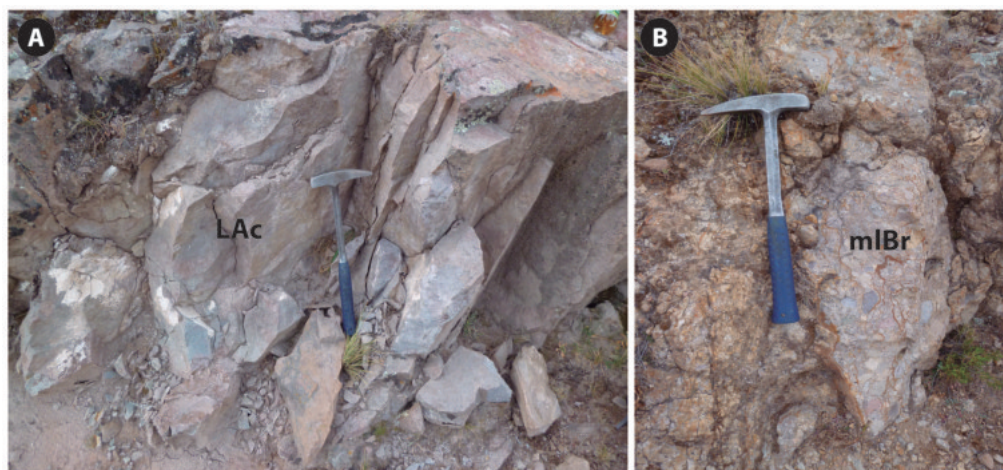


Figura 6.13: Litofacies del Miembro A de la columna Antajahua. A) Andesitas porfíricas con fenocristales de plagioclasas. B) Brechas piroclásticas.

6.1.5 Columna Catosive

Localizada en la quebrada Tolapallca en los alrededores del poblado Catosive y el cerro Yanapuijo Grande (Figura 6.14) . El Miembro A se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular a los conglomerados rojizos del Grupo Puno e infrayaciendo al Miembro B de la Formación Pichu.

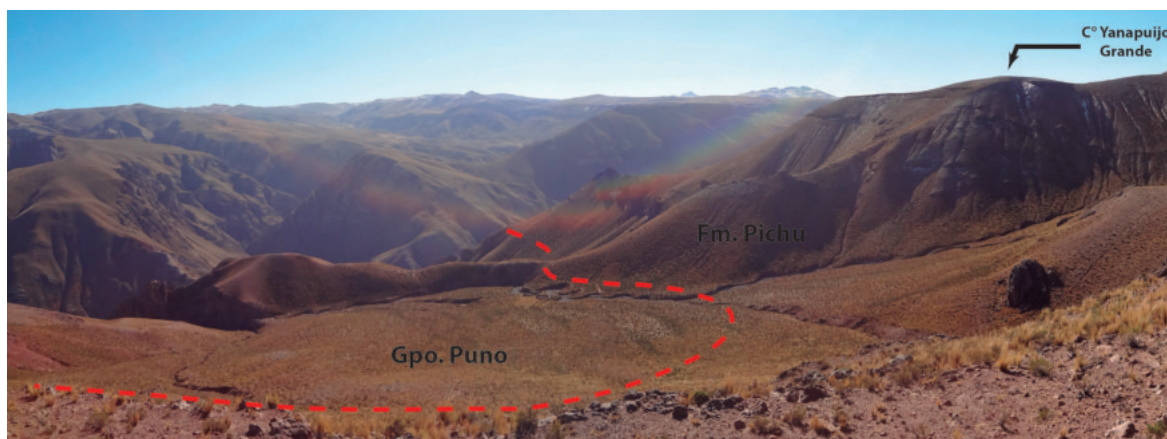


Figura 6.14: Contacto entre la Formación Pichu y el Grupo Puno, vista hacia el oeste.

La secuencia esta constituida de aproximadamente 110m de rocas volcánicas en la columna estratigráfica Catosive (Figura 6.16). Las rocas volcánicas constan de tobas brechas gris verdosas con fragmentos líticos heterogéneos con niveles esporádicos de conglomerados clasto soportado y conglomerados matriz soportado con clastos volcánicos heterogéneos, calizas y areniscas cuarzosas, estos clasto representan el basamento Jurásico y Cretácico inferior (Figura 6.15). Hacia el tope de la secuencia se presenta una toba rica en cristales de plagioclasas, feldespato potásico y algunos fragmentos líticos.

Las litofacies identificadas son Gmm, Gmg, mlBr, mcrT (Figura 6.15). Estas facies evidencian el vulcanismo explosivo con interrupciones de episodios aluvio-fluviales.

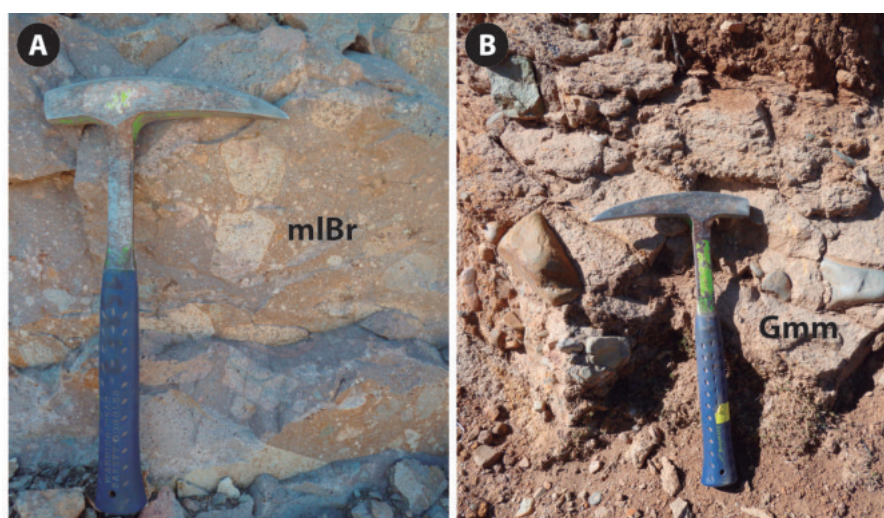


Figura 6.15: Litofacies del Miembro A de la columna Catosive. A) Tobas-brechas de clastos volcánicos heterogéneos. B) Conglomerados polimícticos.



Figura 6.17: Contacto entre la Fm. Pichu? y el Gpo. Maure, flanco derecho del río Coralaque, vista hacia el noreste.

La Columna estratigráfica Coralaque (Figura 6.19) consta de aproximadamente 180m de rocas volcánicas. La secuencia volcánica esta constituida por una intercalación de rocas andesíticas masivas con textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas y andesitas con foliación, rocas basálticas masivas, brechas volcánicas autoclásticas presentes de manera irregular en la secuencia tobas de cristales y tobas-brechas con clastos heterogéneos.

Las litofacies identificadas son LAc, LAa, LAc(f), LBc, mcrT y mlBr (Figura 6.18). Estas facies indican una alternancia de vulcanismo explosivo y efusivo.

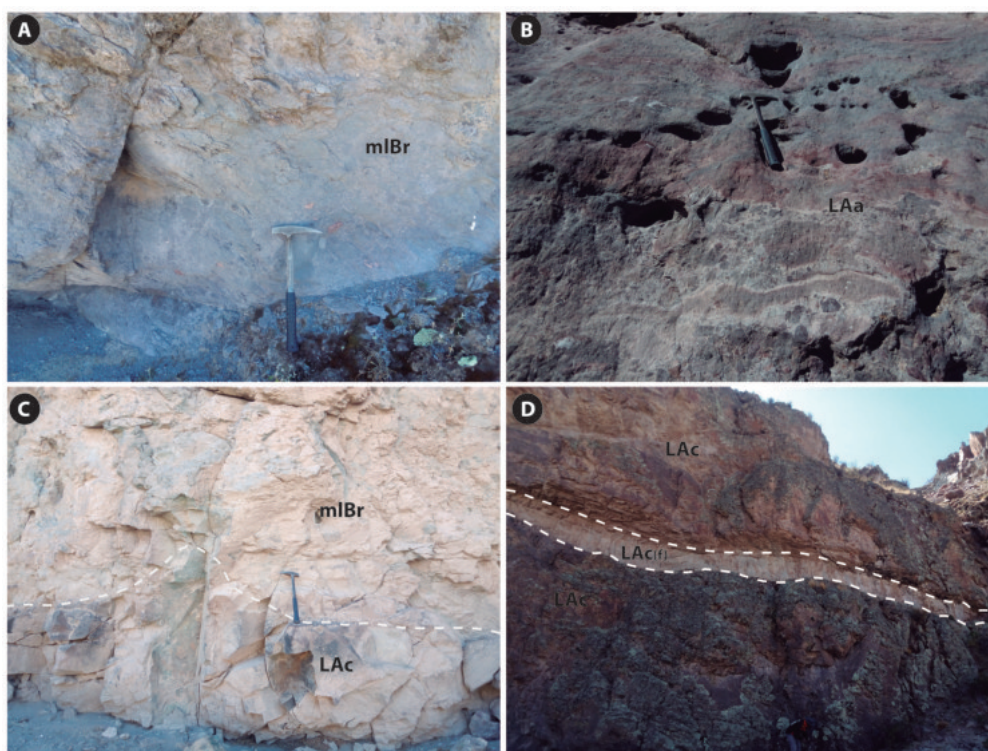


Figura 6.18: Litofacies de la secuencia inferior de la columna Totorani. A) Tobas-brechas con clastos heterogéneos. B) Andesitas autoclásticas. C) Andesitas masivas y tobas-brechas con clastos heteropéneos. D) Andesitas masivas y con foliación por flujo.

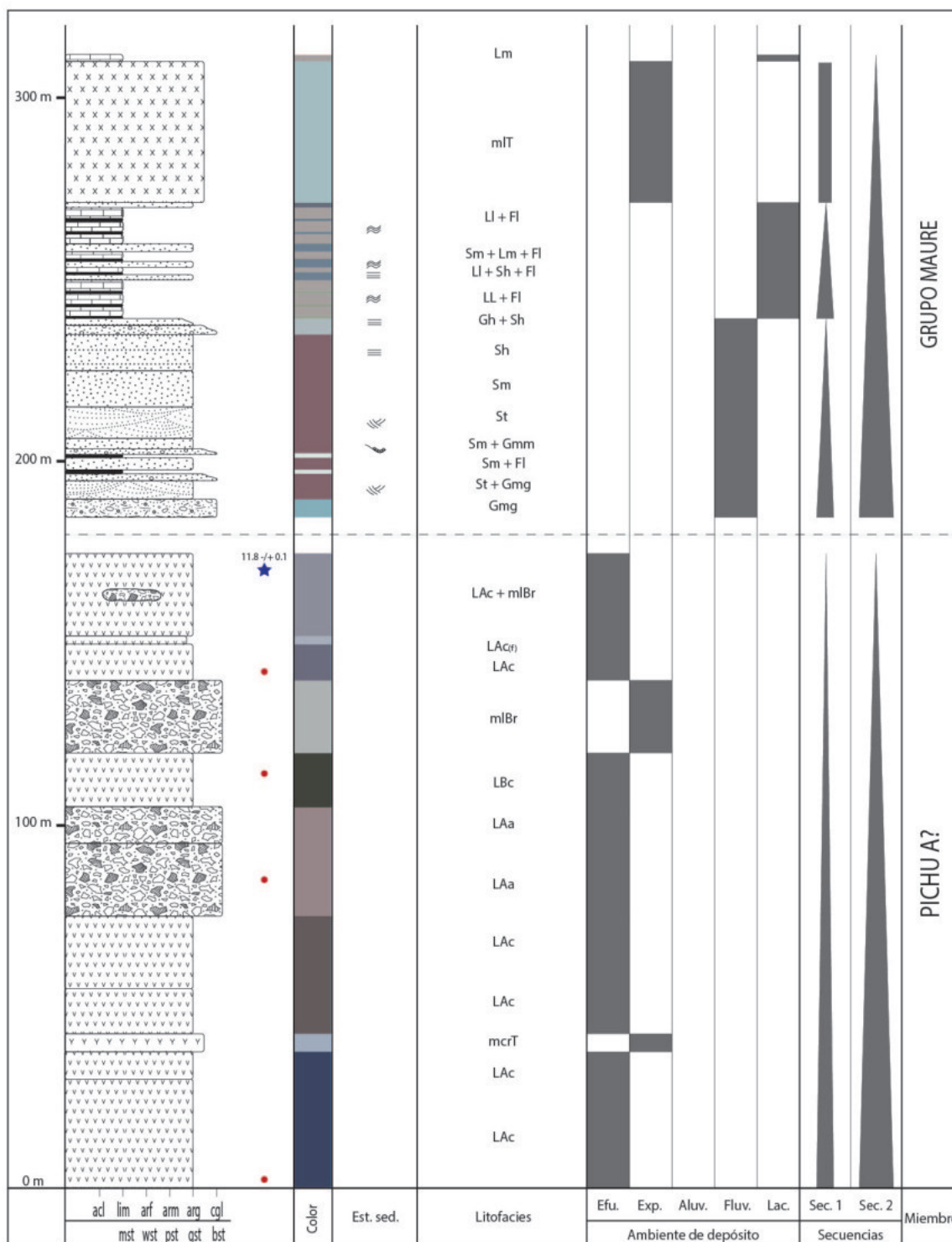


Figura 6.19: Columna estratigráfica que muestra una secuencia volcánica en los alrededores del poblado Coralaque.

En la parte superior de la secuencia existe una datación de 11.2 Ma en roca total por el método Ar/Ar realizada por *Martínez y Cervantes (2003)*. Esta datación ubica a la secuencia volcánica dentro del Mioceno; por ende esta secuencia volcánica pertenecería a un evento volcánico durante el Mioceno, lo cual está fuera del rango de edad propuesto para la Formación Pichu.

6.2 Miembro B

Este miembro B corresponde a una secuencia fluvial con niveles volcánicos que se encuentra sobreyaciendo al Miembro A, aflora en los alrededores de Ichuña, Jesús María, Coalaque y Lagunillas.

Esta compuesto de aproximadamente 200m de conglomerados polimícticos de coloración gris verdosa, areniscas volcanogénicas de coloración gris verdosa, limoarcillitas, tobas y brechas piroclásticas.

En el sector de Lagunillas esta secuencia aluvio-fluvial presenta un mayor desarrollo, lo cual está evidenciado con el aumento de la potencia (>500 m).

6.2.1 Columna Llapapata

Localizada en los alrededores del cerro Llapapata (Figura 6.20) hacia el oeste de la laguna Lagunillas. Aquí afloran niveles sedimentarios con buzamiento ligeramente inclinado hacia el sur.

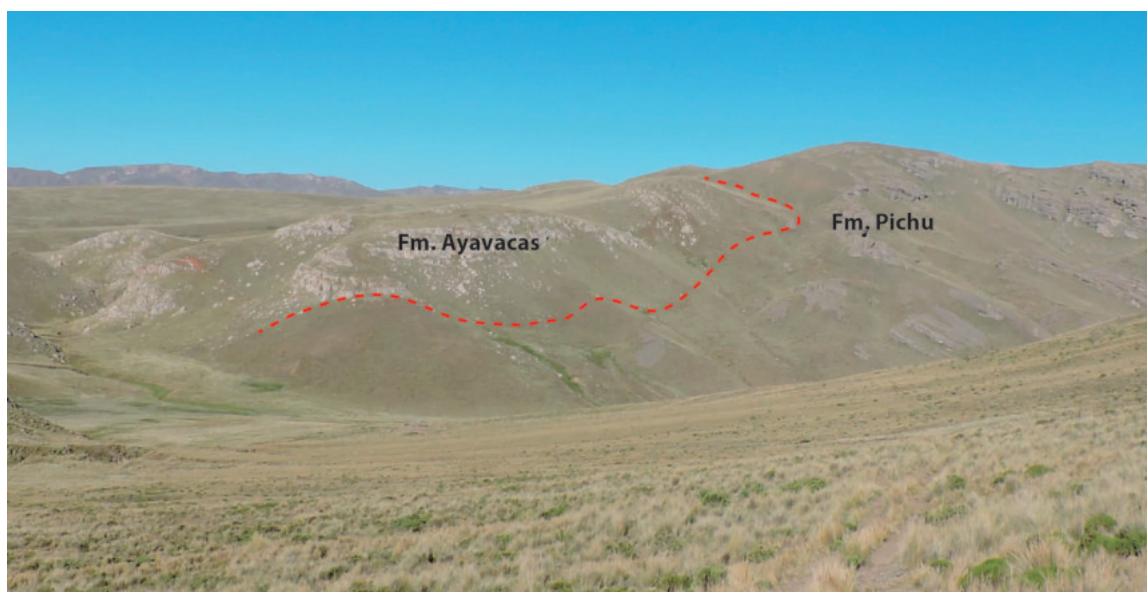


Figura 6.20: Contacto entre la Fm. Pichu y la Fm. Ayabacas, vista hacia el Norte en la quebrada Guiota (332245/8246732).

La columna estratigráfica fue levantada a partir del contacto con las calizas de la Formación Ayabacas (Figura 6.21). En esta zona los conglomerados de la Formación Pichu se encuentran sobreyaciendo en discordancia angular a las calizas de la Formación Ayabacas.

La secuencia esta representada en aproximadamente 120m y presenta en su base conglomerados polimícticos de guijarros y bloques en una matriz arenosa de grano grueso compuesta por material volcánico, los clastos que conforman los conglomerados representan el basamento del

Jurásico y Cretácico inferior y alcanzan diámetros de 40cm. Entre estos conglomerados se encuentran niveles de areniscas de grano grueso compuestas por material volcánico (Figura 6.22). Hacia el tope de la columna estratigráfica se presenta un nivel de roca andesítica de textura porfírica, la cual presenta fenocristales de plagioclasas.

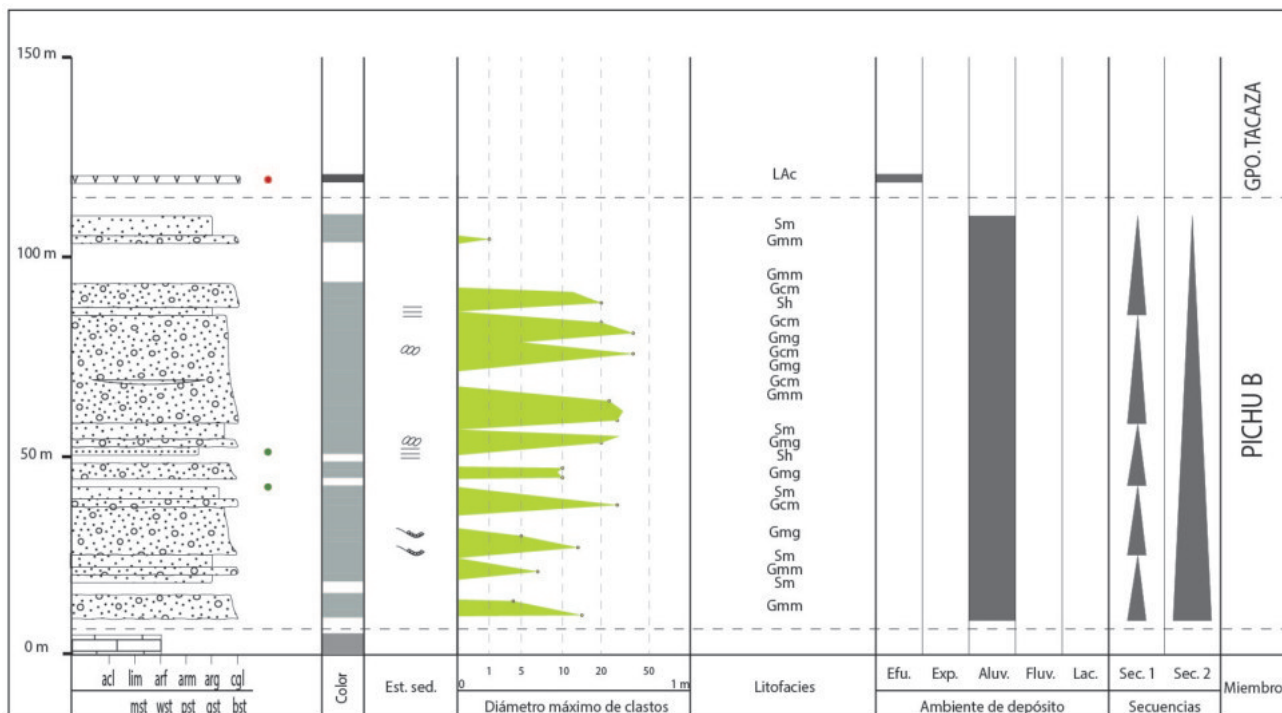


Figura 6.21: Columna estratigráfica del Miembro B de la Formación Pichu en cercanías del cerro Llapapata.

Las litofacies que han sido identificadas son LAc, Gmm, Gmg, Gcm, Sm y Sh (Figura 6.22).



Figura 6.22: Litofacies de la columna Llapapata. A) Conglomerado clasto soportado. B) Areniscas con laminaciones horizontales y masivas.

6.2.2 Columna Totorani

Localizada en los alrededores de Totorani (Figura 6.23) hacia el suroeste de la laguna Maguera. Los niveles sedimentarios se encuentran buzando ligeramente inclinado hacia el sur.



Figura 6.23: Contacto entre la Fm. Pichu y la Fm. Ayabacas, vista hacia el Sur en la quebrada ubicada hacia el suroeste de la laguna Maguera.

La columna estratigráfica fue levantada a partir del contacto con las calizas de la Formación Ayabacas (Figura 6.24). Las secuencias fluviales de la Formación Pichu se encuentran sobreyaciendo en discordancia angular a las calizas de la Formación Ayabacas.

El Miembro B en esta zona esta representado por aproximadamente 480m d espesor y han sido identificadas principalmente cuatro secuencias.

- **Secuencia inferior (8-112m):** es una secuencia grano decreciente compuesta por conglomerados polimícticos de guijarros y bloques en una matriz arenosa de grano grueso de coloración gris verdosa compuesta por material de origen volcánico, hacia la parte intermedia y superior se incrementan los niveles de areniscas de coloración gris verdosa con componentes de origen volcánico, estas areniscas se encuentran intercaladas con niveles conglomeradicos que pueden presentar base erosiva de canal. Los clastos de los conglomerados en su mayoría son rocas volcánicas, calizas y areniscas cuarzosas, estos clastos representan el basamento Jurásico y Cretácico inferior y alcanzan diámetros de 27cm.

Las litofacies que han sido identificadas son Gcm, Gmg, Gmm, Gh, Sm, Sh, St (Figura 6.25).

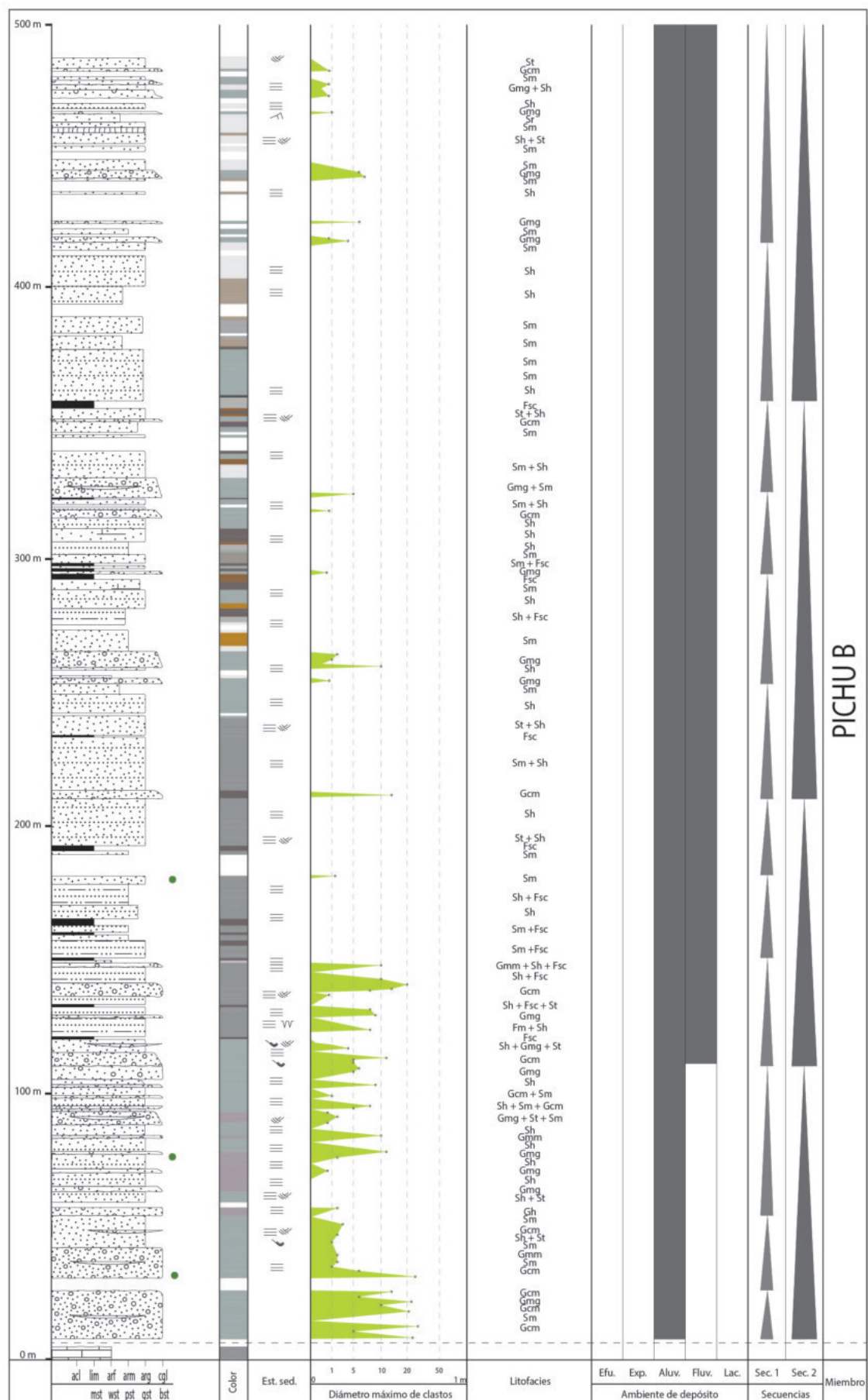


Figura 6.24: Columna estratigráfica del Miembro B de la Formación Pichu en cercanías de Totorani.



Figura 6.25: Litofacies de la secuencia inferior de la columna Totorani. A) Conglomerados clasto soportado y matriz soportado. B) Conglomerado clasto soportado y areniscas con laminaciones horizontales. C) Conglomerados clasto soportado y matriz soportado, y areniscas con laminaciones horizontales y laminaciones oblicuas curvas D) Areniscas masivas y laminaciones horizontales.

- **Secuencia intermedia 1 (112-210m):** es una secuencia grano decreciente y esta compuesta por una intercalación de conglomerados, areniscas y limoarcillitas. Los conglomerados son polimícticos con guijarros y bloques de rocas volcánicas, calizas y areniscas cuarzosas que alcanzan diámetros hasta 20 cm, los clastos se encuentran envueltos en una matriz arenosa de grano grueso de coloración gris verdosa compuesta por material de origen volcánico, los conglomerados en ocasiones suelen presentarse como base erosiva de canal. Las areniscas son de coloración gris verdosa con componentes de origen volcánico y otras areniscas son de coloración gris a violáceo y presenta abundantes cristales de plagioclasa y fragmentos líticos envueltos en una matriz limoarcillosa. Las limoarcillitas son de coloración gris a violácea. La parte intermedia de la secuencia consta de una intercalación de areniscas y limoarcillitas; finalmente hacia la parte superior de la secuencia hay un predominio de areniscas de grano medio a grueso.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gcm, Gmm, Sm, Sh, St, Fsc y Fm (Figura 6.26).

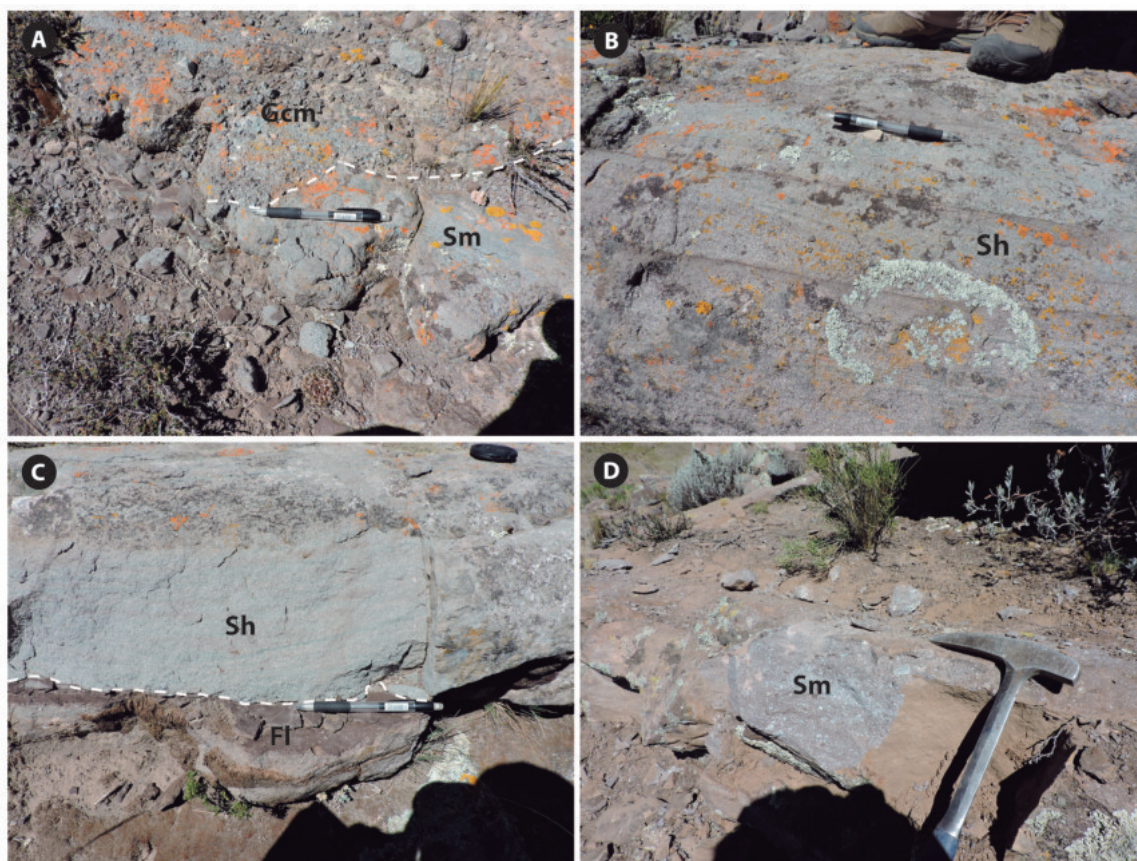


Figura 6.26: Litofacies de la secuencia intermedia 1 de la columna Totorani. A) Conglomerado clasto soportado masivo y areniscas masivas. B) Areniscas con laminaciones horizontales. C) Areniscas con laminaciones horizontales y limoarcillitas con laminaciones finas. D) Areniscas masivas.

- **Secuencia intermedia 2 (210-358m):** esta constituida de una intercalación de conglomerados, areniscas y limoarcillitas. Los conglomerados son polimícticos con guijarros y bloques de rocas volcánicas, calizas y areniscas cuarzosas que alcanzan diámetros hasta 14cm, los clastos se encuentran envueltos en una matriz arenosa de grano grueso de coloración gris verdosa compuesta por material de origen volcánico, los conglomerados en ocasiones suelen presentarse como base erosiva de canal. Las areniscas son de coloración gris verdosa a violáceas con componentes de origen volcánico, hacia la parte superior se presentan areniscas gris violáceas con matriz calcárea. Las limoarcillitas son de coloración gris a violáceas. Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gcm, Gmm, Sm, Sh, St y Fsc (Figura 6.27).

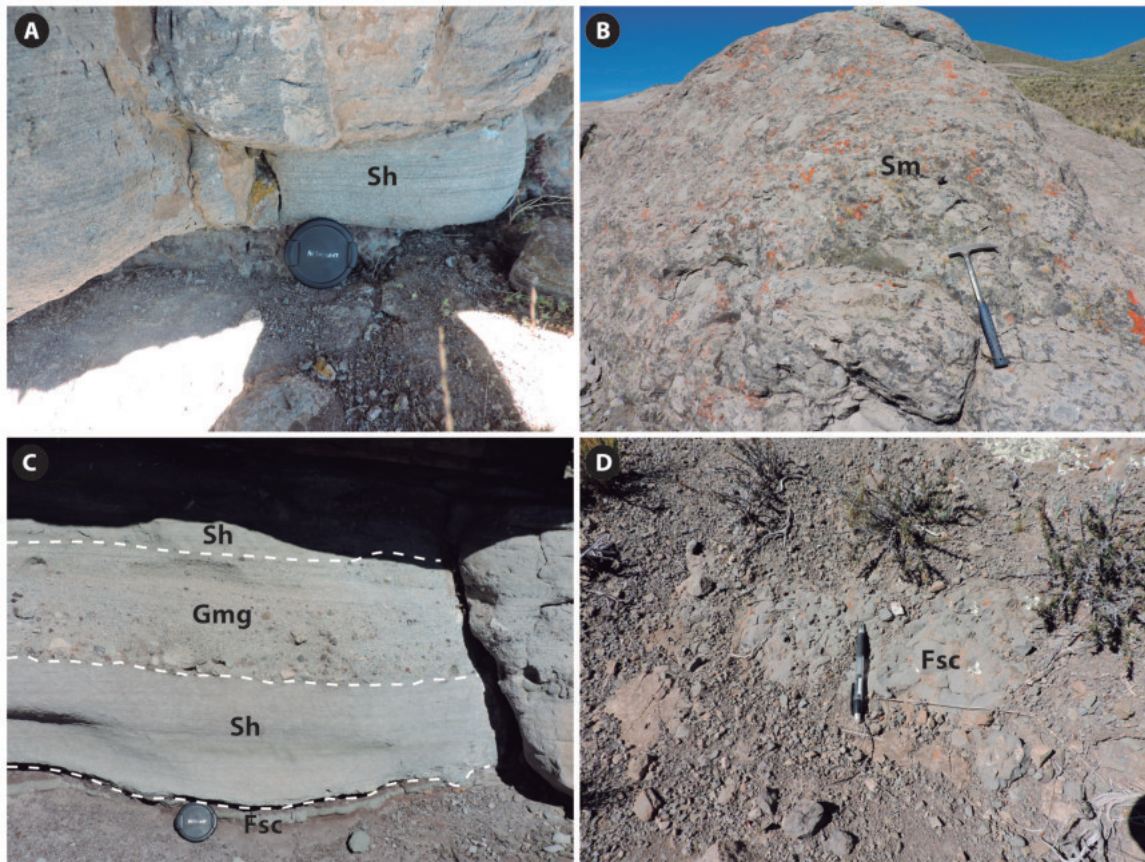


Figura 6.27: Litofacies de la secuencia intermedia 2 de la columna Totorani. A) Areniscas con laminaciones horizontales. B) Areniscas masivas. C) Areniscas con laminaciones horizontales, conglomerado matriz soportado con gradación normal y limoarcillitas laminadas. D) Limoarcillitas masivas.

- **Secuencia superior (358-486m):** esta constituida por areniscas de grano grueso a medio de coloración gris verdosa compuesta por material de origen volcánico, areniscas cuarzosas de grano grueso a medio de coloración gris blanquecina y conglomerados que ocasionalmente se presentan en base erosiva de canal. Los conglomerados son polimícticos clasto y matriz soportado envueltos en una matriz arenosa de coloración gris verdosa compuesta por material de origen volcánico, los clastos provienen de rocas volcánicas, calizas y areniscas cuarzosas, y alcanzan diámetros de 7cm.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gcm, Gmm, Sh, Sr, St (Figura 6.28).

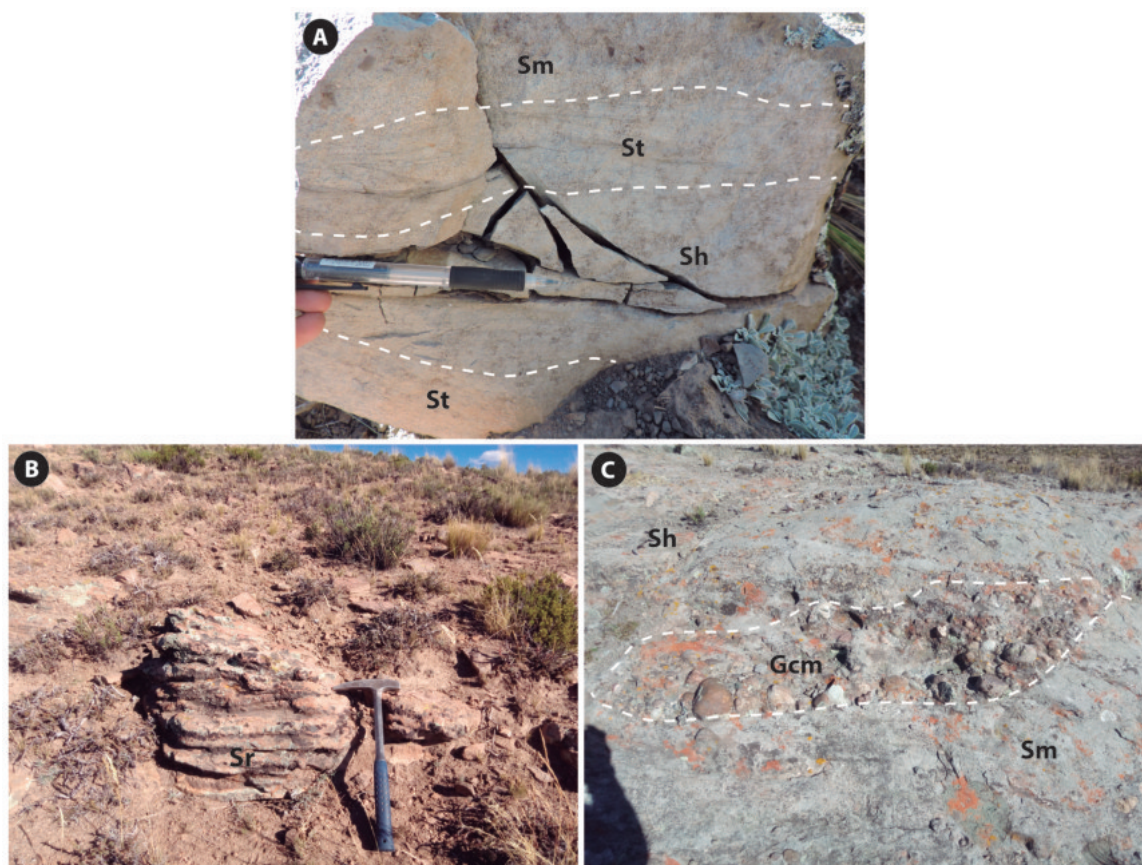


Figura 6.28: Litofacies de la secuencia superior de la columna Totorani. A) Areniscas gris verdosas con laminaciones horizontales, laminaciones oblicuas curvas y masivas. B) Areniscas cuarzosas con laminación cruzada con ripple marks. C) Areniscas masivas y con laminaciones horizontales y conglomerados clasto soportado masivo.

6.2.3 Columna Jesús María

Localizada entre los poblados de Jesús María, Pacchi Chico, Huancune y Crucero (Figura 6.29). Los estratos se encuentran buzando ligeramente hacia el norte. El miembro B se encuentra sobreyaciendo al Miembro A de manera casi concordante.



Figura 6.29: Contacto entre los Miembros A y B de la Formación Pichu, vista hacia el Norte desde el pueblo Huancune.

El Miembro B se encuentra sobreyaciendo al Miembro A de la Formación Pichu y se encuentra infrayaciendo discordantemente al Grupo Tacaza. La secuencia esta representada por aproximadamente 150m de rocas sedimentarias (Figura 6.31) compuestas por conglomerados, areniscas y limoarcillitas. Los conglomerados son polimícticos matriz soportado de coloración gris verdosa, los clastos son subredondeados a subangulosos y se encuentran en una matriz arenosa con componentes de origen volcánico. Las areniscas son de grano grueso a medio con componentes de origen volcánico y son de coloración gris verdosas. Las limoarcillitas son de coloración gris verdosa a violácea.

Las litofacies que han sido identificadas son Gcm, Gmm, Sm, Sh y St (Figura 6.30).

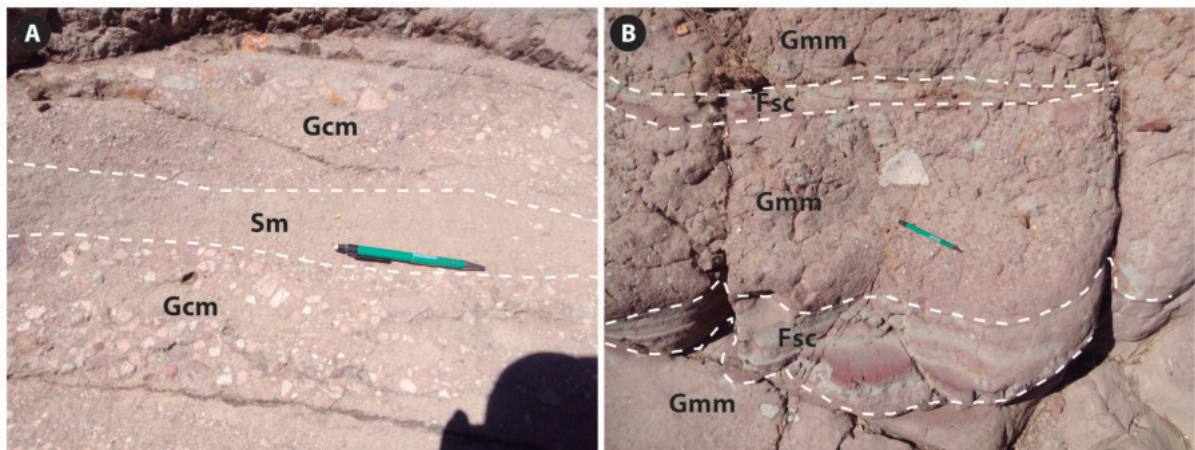


Figura 6.30: Litofacies del Miembro B de la columna Jesús María. A) Conglomerados clasto soportado masivos y areniscas masivas. B) Conglomerados matriz soportado masivos y limoarcillitas laminadas.

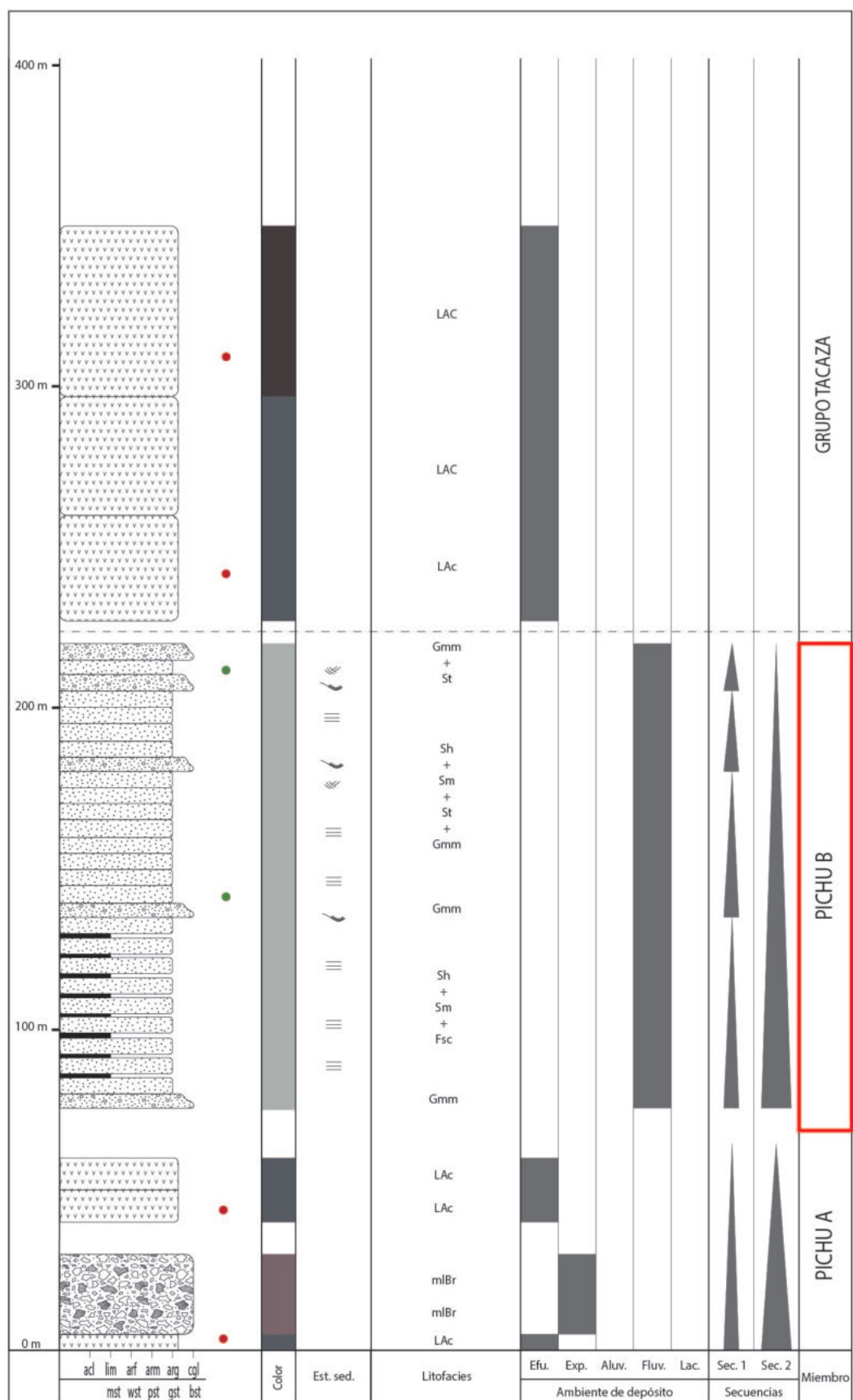


Figura 6.31: Columna estratigráfica que muestra el Miembro B de la Formación Pichu en cercanías de la localidad de Jesús María.

6.2.4 Columna Antajahua

Localizada en la quebrada Janajhuyco y el cerro Quinsachata (Figura 6.32), en las cercanías del poblado Antajahua y Quilcata. El Miembro B se encuentra sobreyaciendo al Miembro A.

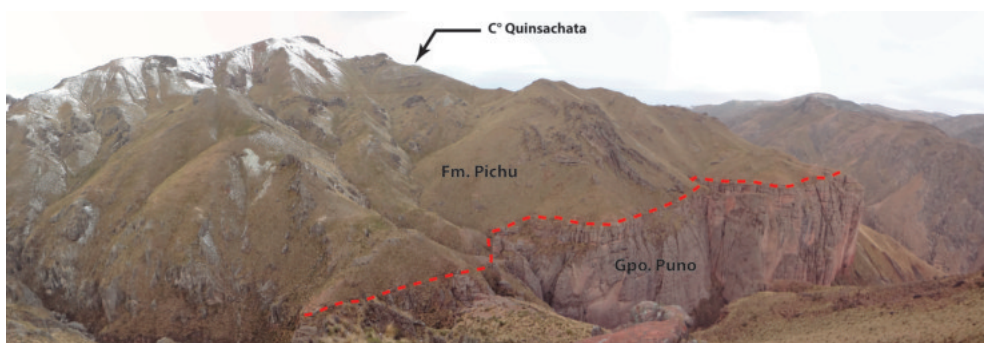


Figura 6.32: Contacto entre la Formación Pichu y el Grupo Puno, vista hacia el cerro Quinsachata.

La secuencia consta de aproximadamente 80m de rocas sedimentarias con niveles volcánicos (Figura 6.33). Los conglomerados de coloración gris verdosa, polimícticos en una matriz arenosa con contenido de material de origen volcánico; areniscas gris verdosas de grano grueso a medio con material de origen volcánico. Dentro de la secuencia están presentes algunos niveles volcánicos que corresponden a tobas y brechas piroclásticas.

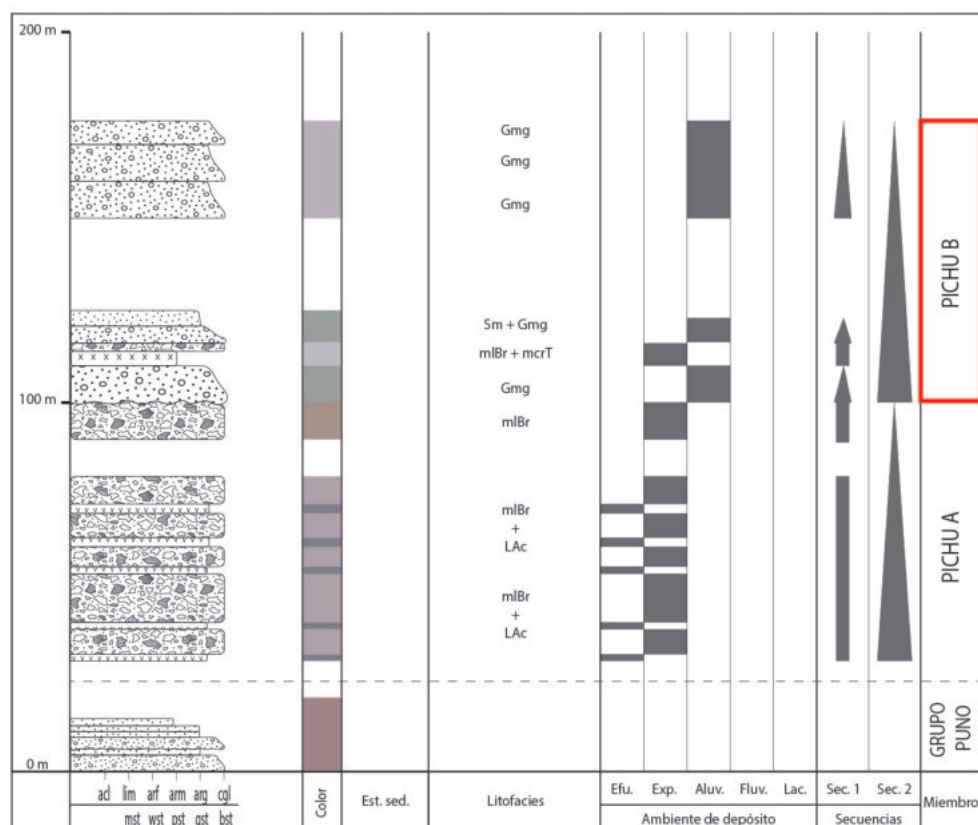


Figura 6.33: Columna estratigráfica que muestra el Miembro B de la Formación Pichu en los alrededores del poblado Antajahua.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Sm, mlBr y mcrT (Figura 6.34); las litofacies evidencian eventos volcánicos durante la depositación de las unidades sedimentarias.

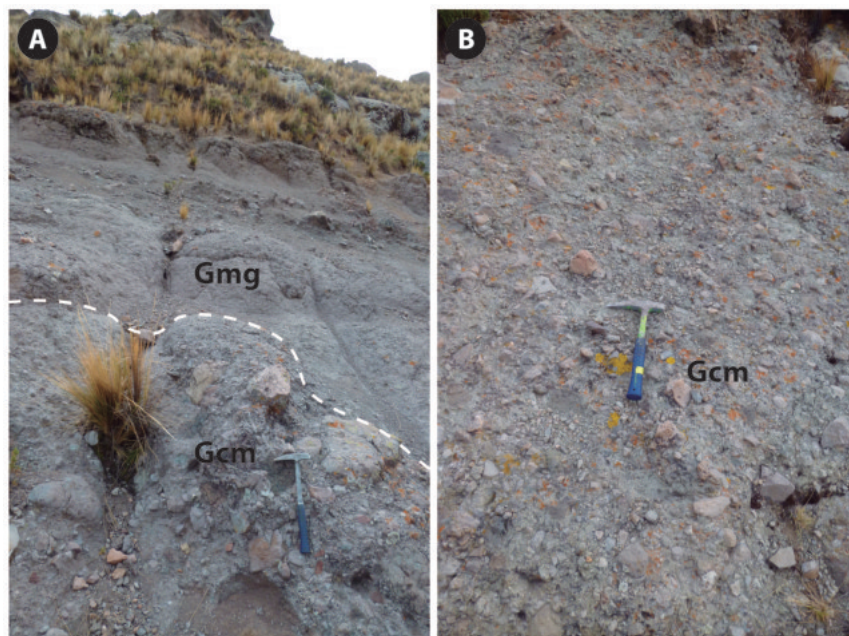


Figura 6.34: Litofacies del Miembro A de la columna Catosive. A) Conglomerados polimícticos clasto y matriz soportado. B) Conglomerados polimícticos clasto soportado.

6.2.5 Columna Catosive

Localizada en la quebrada Tolapallca en los alrededores del poblado Catosive y el cerro Yanapuijo Grande (Figura 6.35) . El Miembro B se encuentra sobreyaciendo al Miembro A e infrayaciendo al Miembro C.

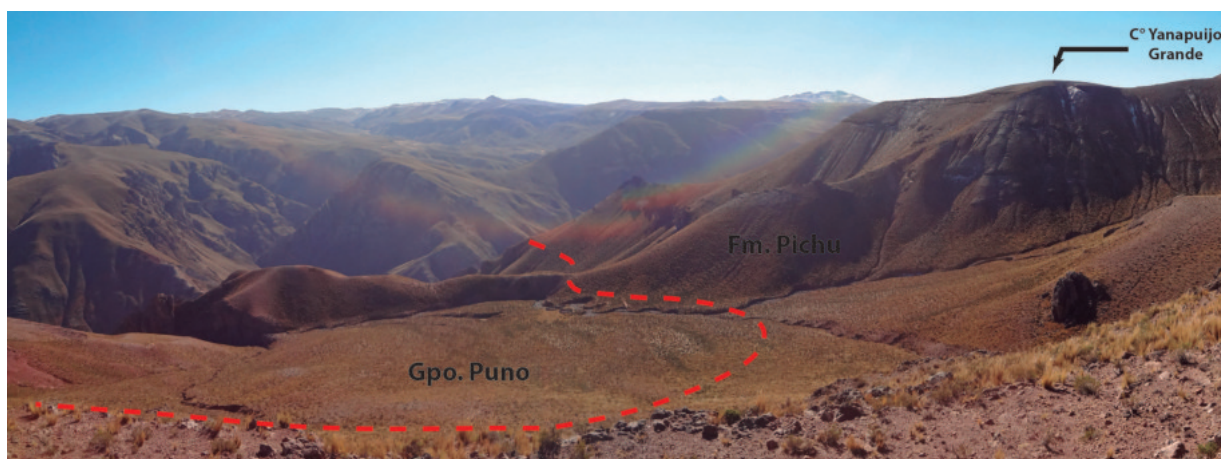


Figura 6.35: Contacto entre la Fm. Pichu y el Gpo. Puno, vista al cerro Yanapuijo Grande.

La secuencia esta constituida de aproximadamente 70m de rocas sedimentarias con niveles de rocas volcánicas (Figura 6.36). Las rocas sedimentarias estan compuestas por Conglomerados y areniscas. Los conglomerados son polimícticos de coloración gris verdosa, la matriz es arenosa de componentes de origen volcánico, los conglomerados se presentan en base erosiva de canal. Las areniscas son de grano grueso a medio de coloración gris verdosa y esta compuesta por material de origen volcánico. Las rocas volcánicas estan compuestas por brechas piroclásticas.

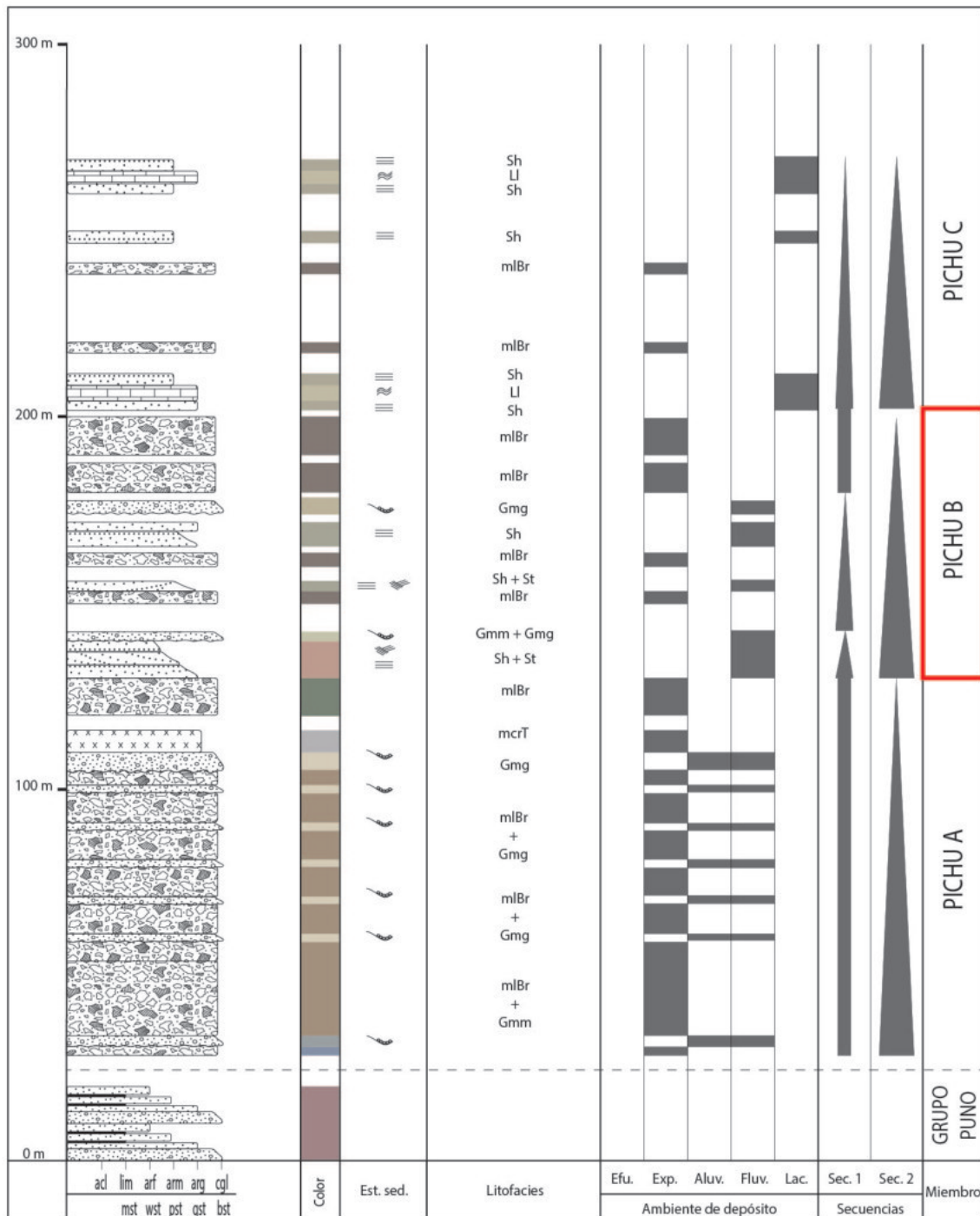


Figura 6.36: Columna estratigráfica que muestra el Miembro B de la Formación Pichu en los alrededores de Catosive.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gmm, Sh, St y mlBr (Figura 6.37); las litofacies evidencian eventos volcánicos durante la depositación de las unidades sedimentarias.



Figura 6.37: Litofacies de la secuencia superior de la columna Totorani. A) Areniscas gris verdosas con laminaciones horizontales. B) Conglomerados polimicticos clasto y matriz soportado. C) tobas-brechas de clasto heterogéneos.

6.3 Miembro C

Este Miembro de la Formación Pichu corresponde a una secuencia fluvio-lacustrina con ocasionales niveles volcánicos de naturaleza explosiva. El Miembro C se encuentra sobreyaciendo al Miembro B, y aflora en los alrededores del poblado catosive.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gmm, Sh, St y mlBr (Figura 6.37); las litofacies evidencian eventos volcánicos durante la depositación de las unidades sedimentarias. Se han reconocido aproximadamente 100m de una intercalación de calizas, areniscas volcanogénicas y brechas piroclásticas. Esta secuencia podría tener un mayor espesor.

6.3.1 Columna Catosive

Localizada en la quebrada Tolapallca en los alrededores del poblado Catosive y el cerro Yanapuijo Grande (Figura 6.38). El Miembro C se encuentra sobreyaciendo al Miembro B de manera concordante.

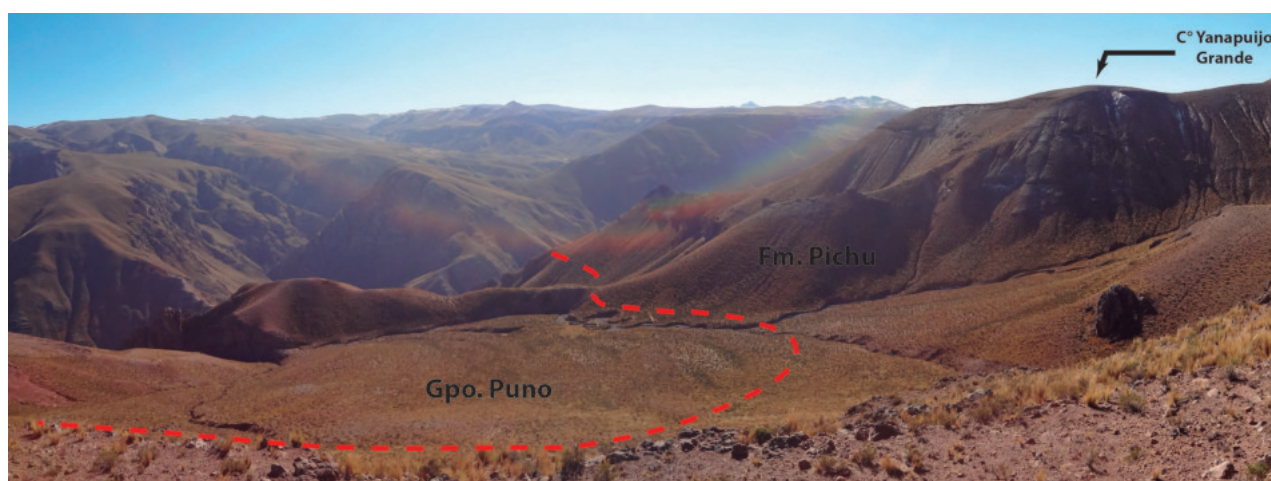


Figura 6.38: Vista del contacto entre la Fm. Pichu y el Gpo. Puno, vista hacia el oeste.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmg, Gmm, Sh, St y mlBr (Figura 6.37); las litofacies evidencian eventos volcánicos durante la depositación de las unidades sedimentarias. El Miembro C esta representado en la parte superior de la columna Catosive (Figura 6.39) y consta de aproximadamente 80m de rocas sedimentarias con niveles volcánicos. En esta columna estratigráfica no se ha registrado el tope del Miembro C.

La secuencia consta de una intercalación de calizas tipo mudstone de color beige con laminaciones algareas con algunos nódulos síliceos, areniscas tobáceas gris verdosas de grano grueso a fino con laminaciones horizontales y esporádicos niveles conglomeradicos con clastos volcánicos. Los niveles volcánicos están constituidos por brechas piroclásticas con clastos de variada composición en una matriz con cristales de plagioclasas y biotitas.

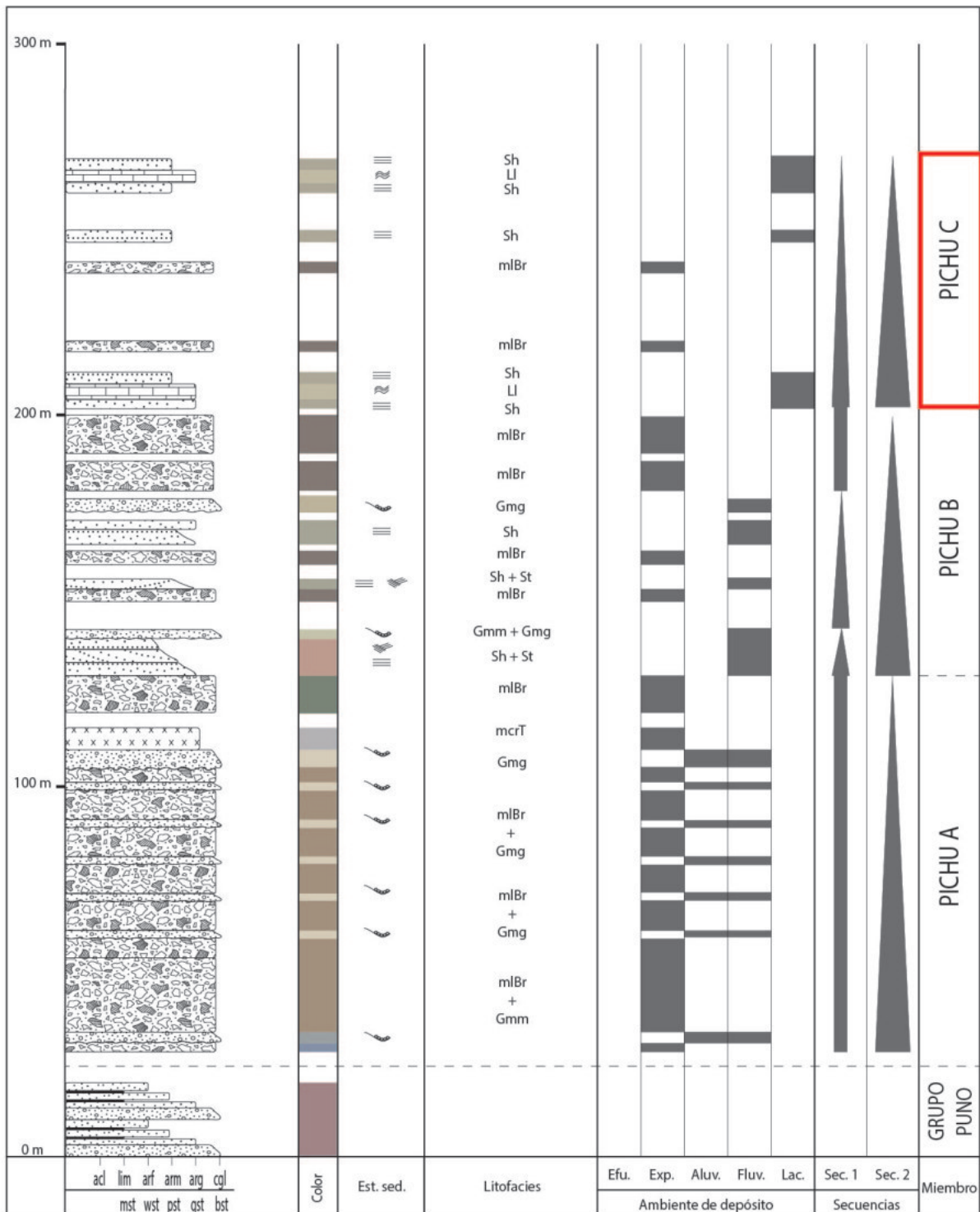


Figura 6.39: Columna estratigráfica que muestra el Miembro C de la Formación Pichu en los alrededores de Catosive.

Las litofacies son Sh, Ll, Lm y mlBr (Figura 6.40); las litofacies volcánicas corresponde a eventos volcánicos explosivos durante la depositación de las secuencias fluvio-lacustrinas.

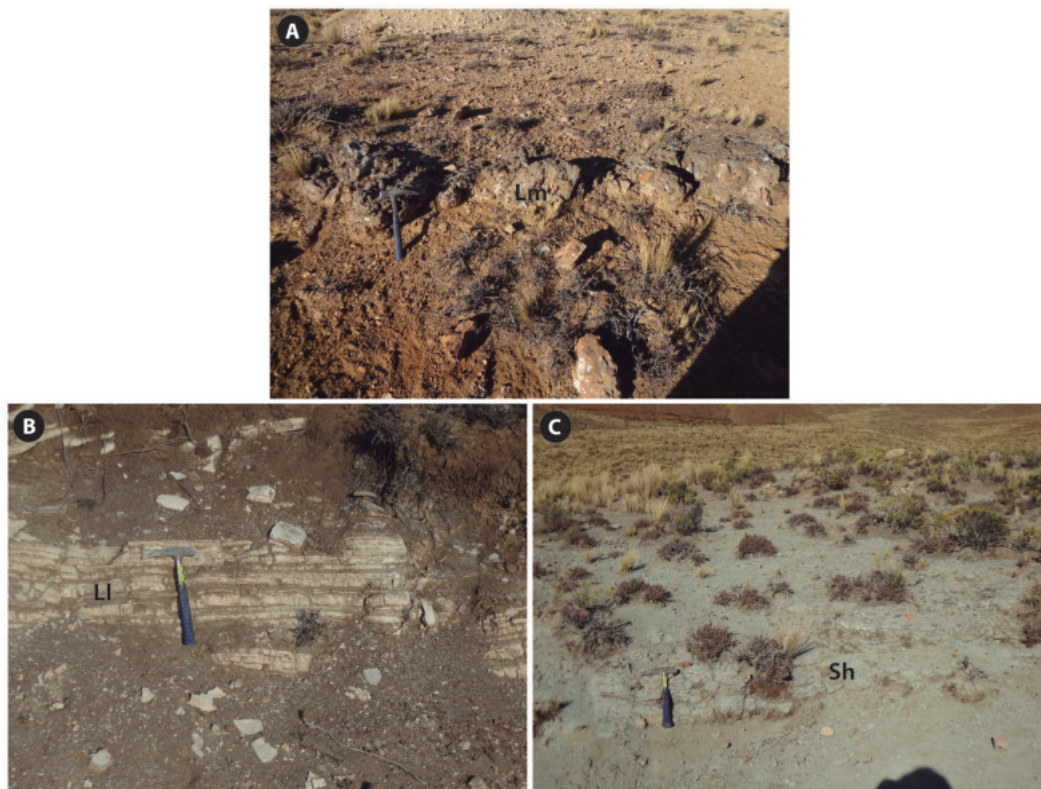


Figura 6.40: Litofacies de la secuencia superior de la columna Totorani. A) Calizas masivas con nódulos síliceos. B) Calizas con laminaciones algareas. C) Areniscas tobáceas con laminaciones horizontales.

6.3.2 Columna Ciguaya

Localizada en la quebrada Ciguaya (Figura 6.41) hacia el norte de Yalagua. Las capas sedimentarias se encuentran buzando ligeramente hacia el este.



Figura 6.41: Contacto entre el Gpo. Puno y el Gpo. Maure en la quebrada Ciguaya, margen derecha del río Tambo, vista hacia el noroeste.

El Miembro C se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular al Grupo Puno e infrayaciendo en la misma relación a una ignimbrita de 16.1 Ma (Bellon y Lefèvre, 1976) del Grupo Maure. La secuencia esta representada por aproximadamente 160m de rocas sedimentarias (Figura 6.42) compuestas por conglomerados, areniscas, limoarcillitas y calizas. En la base se presenta un nivel conglomeradico de matriz soportado de coloración gris verdosa, le siguen areniscas gris verdosas de grano grueso a medio, las areniscas están constituidas por material de origen volcánico con niveles de limoarcillitas violáceas a verdosas y un nivel calcáreo fino. Hacia la parte superior se presentan paquetes de areniscas gris verdosas de grano medio a fino.

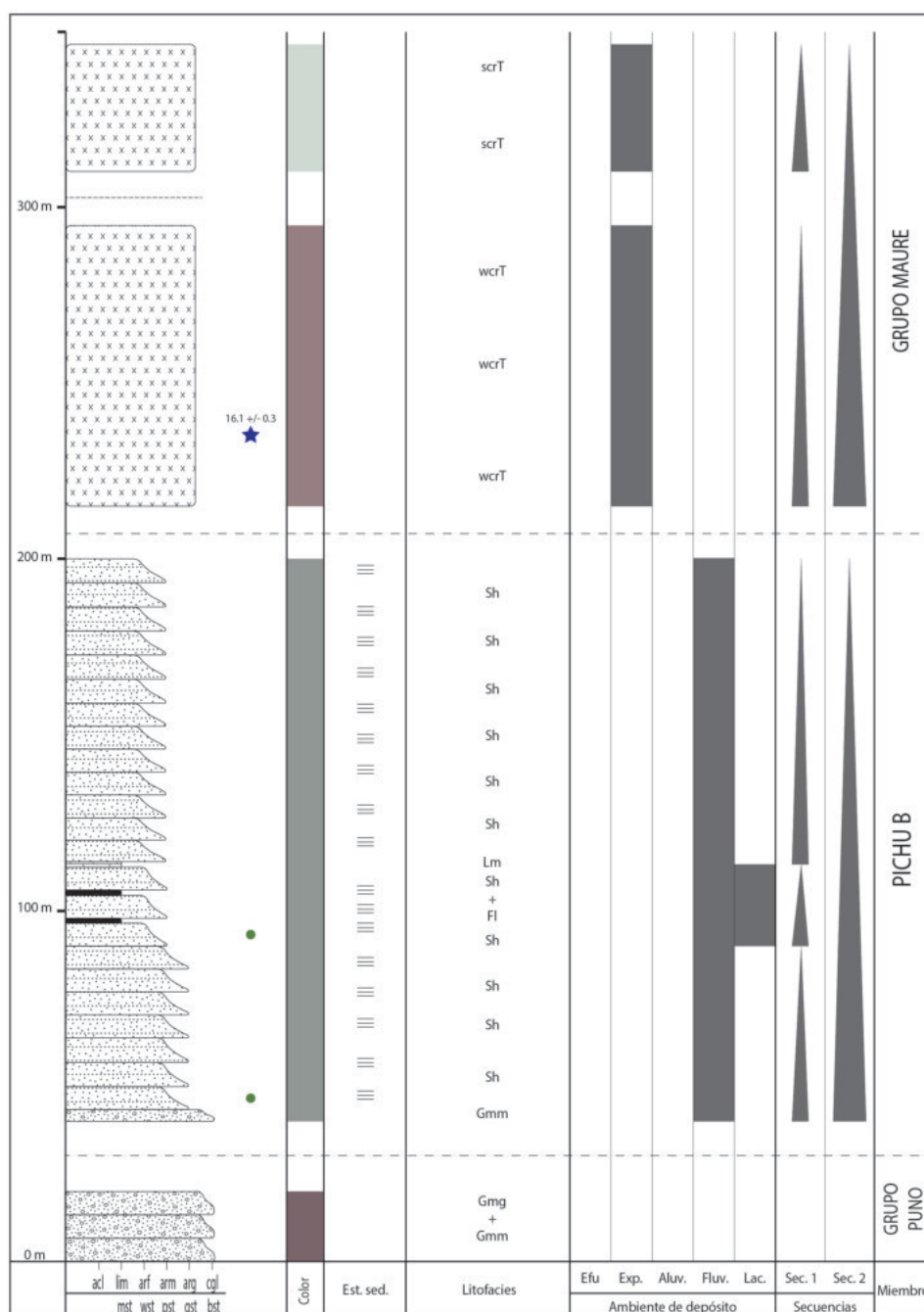


Figura 6.42: Columna estratigráfica que muestra el Miembro B de la Formación Pichu en la quebrada Ciguaya.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmm, Sh, Sm, Fsc, y Lm (Figura 6.43);

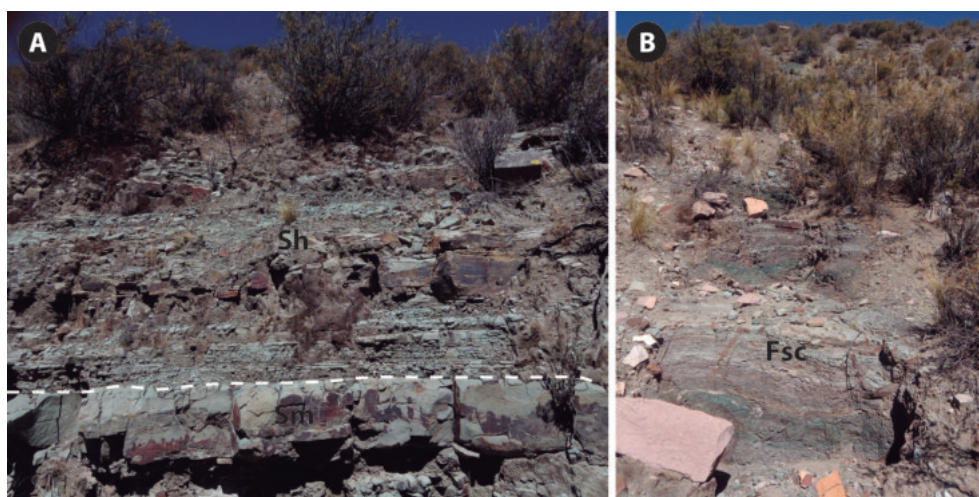


Figura 6.43: Litofacies del Miembro C de la columna Ciguaya. A) Areniscas masivas y areniscas con laminaciones horizontales de coloración gris verdosa. B) Limoarcillitas laminadas violáceas y verdosas.

6.4 Miembro D

Este miembro de la Formación Pichu corresponde a una secuencia de dominio aluvio-fluvial a la base y una secuencia de dominio volcánico con niveles fluviales hacia el tope. El Miembro D se encuentra sobreyaciendo al Miembro C e infrayace al Grupo Tacaza. El Miembro D ha sido reconocido en los alrededores del poblado Chacoyec.

Se han registrado aproximadamente 250m areniscas tobáceas, conglomerados, tobas y tobas-brechas.

6.4.1 Columna Quemillone

Localizada en el margen izquierdo del río Quemillone y en alrededores de los poblados Chacoyec y Hualcataca (Figura 6.44). El Miembro D se encuentra sobreyaciendo al Miembro C e infrayaciendo al Grupo Tacaza.

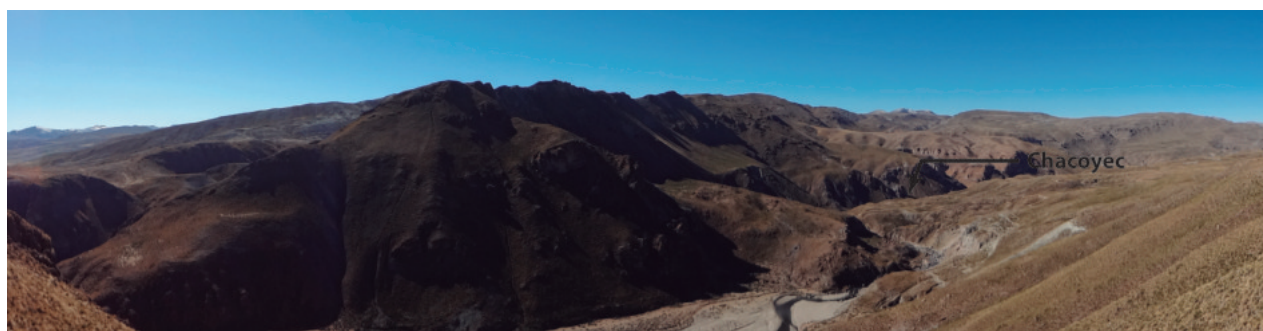


Figura 6.44: Afloramientos del Miembro D cerca de la localidad Chacoyec.

La secuencia esta constituida de aproximadamente 232m de rocas sedimentarias y volcánicas (Figura 6.45). La secuencia inferior consta un intercalación de conglomerados clasto y matriz soportado de coloración grises con clastos volcánicos heterogéneos, areniscas tobáceas de coloración gris verdosa y rosáceas de grano grueso a fino y esporádicos niveles de limoarcillitas gris verdosas. La secuencia superior consta de tobas-brechas, tobas ricas en cristales y esporádicos niveles sedimentarios constituídos por conglomerados clasto soportados con clastos volcánicos heterogéneos y areniscas tobáceas gris verdosas de grano grueso a fino de coloraciones gris verdosas a blanquecinas.

Las litofacies que han sido identificadas son Gmm, Gcm, Gmg, Sh, St, Fsc, mlBr, mcrT (Figura 6.46); las litofacies evidencian un incremento de la actividad volcánica explosiva hacia la parte superior de la secuencia.

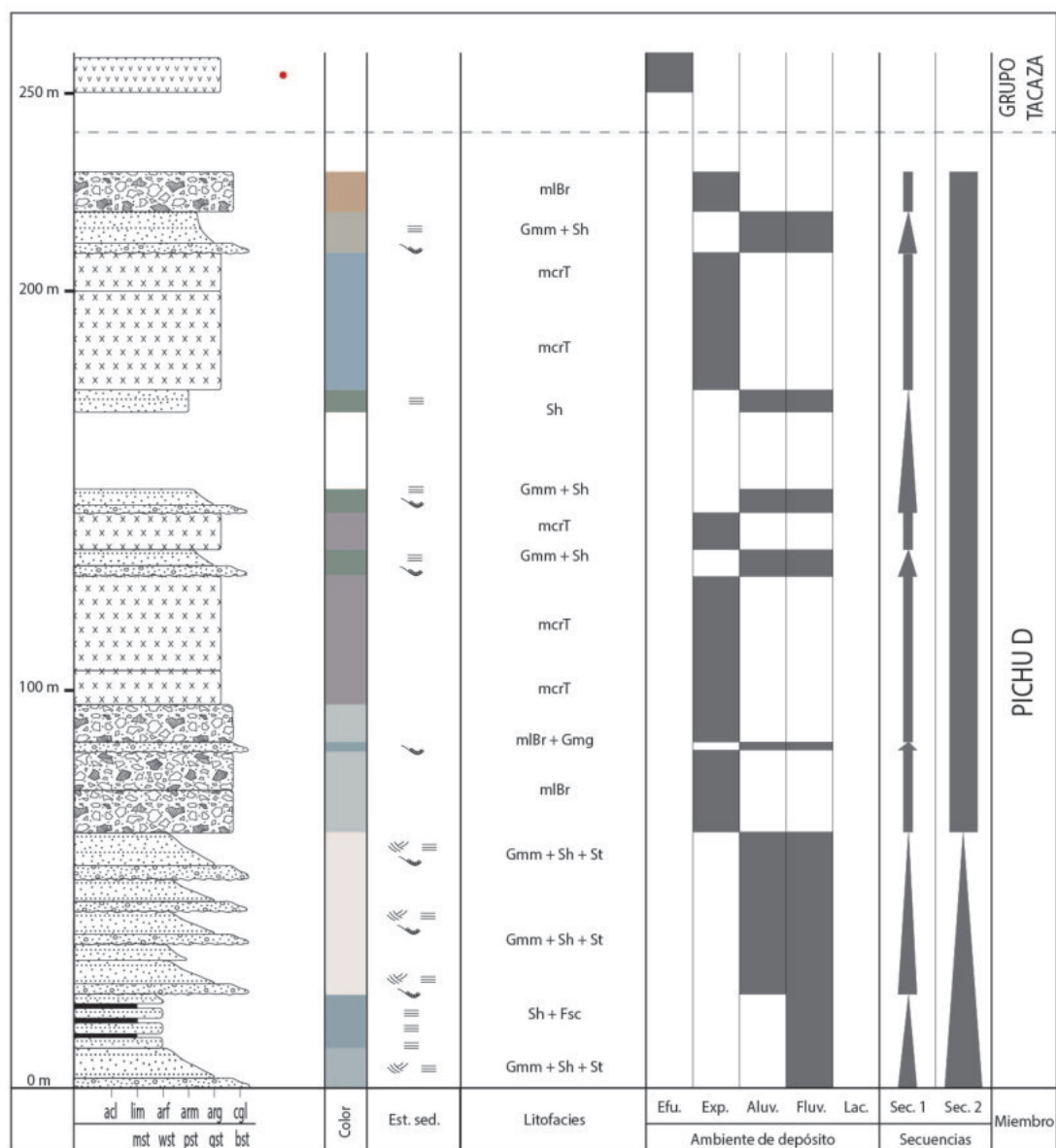


Figura 6.45: Columna estratigráfica que muestra el Miembro D de la Formación Pichu en los alrededores de Chacoyec.

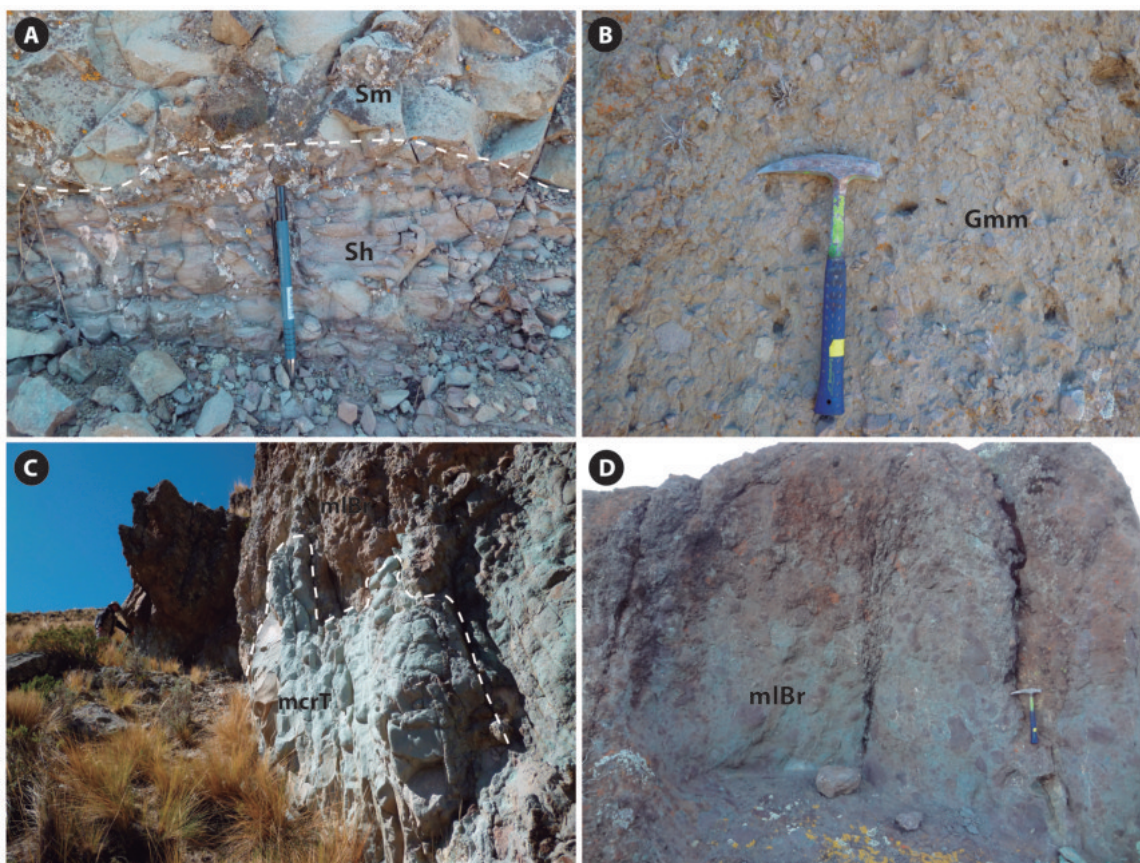


Figura 6.46: Litofacies del Miembro D de la Formación Pichu en la Columna Quemillone. A) Areniscas tobáceas con laminaciones horizontales y masivas. B) Conglomerados matriz soportados con clastos volcánicos heterogéneos. C) Tobas ricas en cristales y tobas-brechas de clastos heterogéneos. D) Tobas-brechas con clastos heterogéneos.

6.5 Correlación de Columnas Estratigráficas

Las correlaciones litoestratigráficas se realizaron con el fin de obtener información más completa del registro sedimentario; es así que estableciendo la correspondencia entre registros litoestratigráficos, los cuales se encuentran separados geográficamente, permitirá entender y reconstruir la posible geometría de la cuenca y la distribución de las facies de la Formación Pichu (Figura 6.50).

Las correlaciones toman en cuenta la ubicación espacial de las columnas estratigráficas dentro del área de estudio, es así que se tiene el sector Norte y el sector Centro. El sector norte (Figura 6.47) en el cual se realiza una correspondencia entre las columnas Llapapata y Totorani, y el sector Centro (Figura 6.48) en el cual se realiza una correspondencia entre las columnas Catosive, Antajahua, Chahuana, Jesús María y Jachata.

6.5.1 Sector Norte

En el sector Norte se han registrado las facies del Miembro B correspondientes a facies aluvio-fluviales, las cuales muestran un amplio desarrollo; estas a su vez corresponden al relleno Eoceno-Oligoceno de la Cuenca Tincopalca (Rodríguez *et al.*, 2002).

Las columnas Totorani y Llapapata se encuentran limitadas en la base por las calizas de la Formación Ayavacas, y al tope por las rocas volcánicas lávicas Carayccasa (Gpo. Tacaza) de 26.5 Ma (*Fornari et al. (2002)* y *Rousse et al. (2005)*).

El análisis y asociación de facies permite determinar las secuencias principales y la correspondencia de estas entre ambas columnas estratigráficas; es así que se puede establecer que las facies de la Columna Llapapata corresponden a la secuencia inferior de la columna Totorani (Figura 6.47), por ende las facies superiores en el sector de Totorani se encuentran ausentes en el sector de Llapapata.

6.5.2 Sector Centro

En el sector Centro se han registrado las facies de los Miembros A, B, C y D, las cuales corresponden a Rocas volcánica con interdigitaciones sedimentarias que varían desde depósitos aluvialo-fluviales a fluvio-lacustres, estas facies a su vez corresponden al Relieve de Ichuña registrado por *Rodríguez et al. (2002)*.

Los registros de las columnas estratigráficas muestran facies de manera bastante heterogenea; sin embargo, se logra realizar una correlación entre las mismas. La secuencia se encuentra limitada a la base por los depósitos continentales del Grupo Puno, y al tope por las rocas volcánicas del Grupo Tacaza.

El análisis y asociación de facies permite determinar la correspondencia de los Miembros principales entre las columnas estratigráficas (Figura 6.48); es así que tomando en cuenta la disposición y acumulación de las rocas volcánicas en la columnas Chahuana y Jachata, se presume que los centros volcánicos se presentan a los alrededores del sector de Ichuña y otro hacia en los alrededores del sector de Jachata?

6.5.3 Sector Sur

En el sector Sur se han registrado facies fluvio-Lacustrinas del Miembro C, las cuales corresponden a la Cuenca Huacochullo descrita por *Rodríguez et al. (2002)*.

Las columnas Ciguaya se encuentra limitada a la base por los depósitos continentales de los conglomerados Ciguaya (Figura 6.42) y al tope por una ignimbrítica del Grupo Maure, la cual está datada en 16.1 Ma por *Bellon y Lefèvre (1976)*; por otro lado en el sector de Umalso se observaron una secuencia lacustrina limitada al tope por las rocas lávicas del Grupo Tacaza.

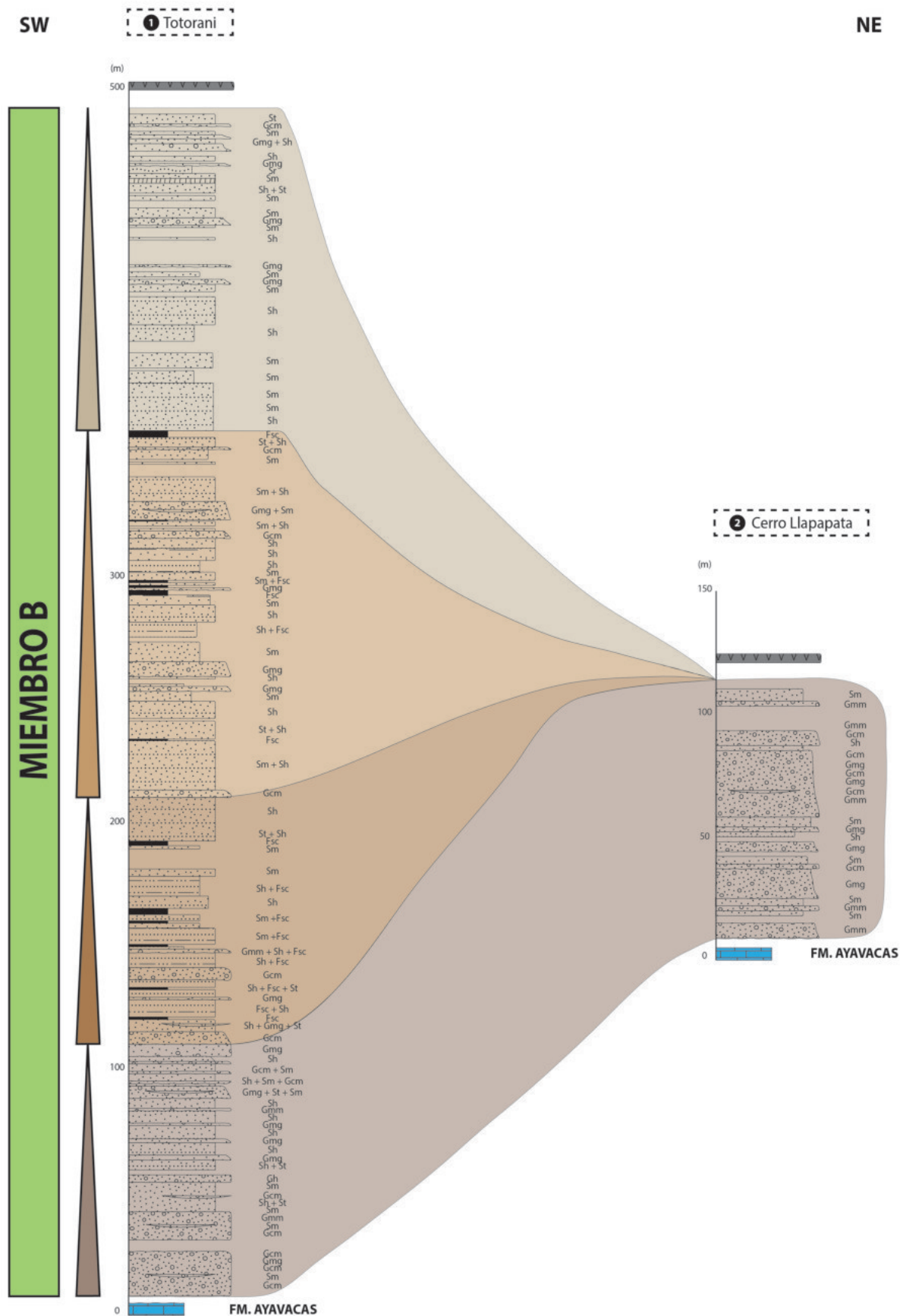


Figura 6.47: Correlación de las columnas Totorani y Llapapata en los alrededores de Lagunillas.

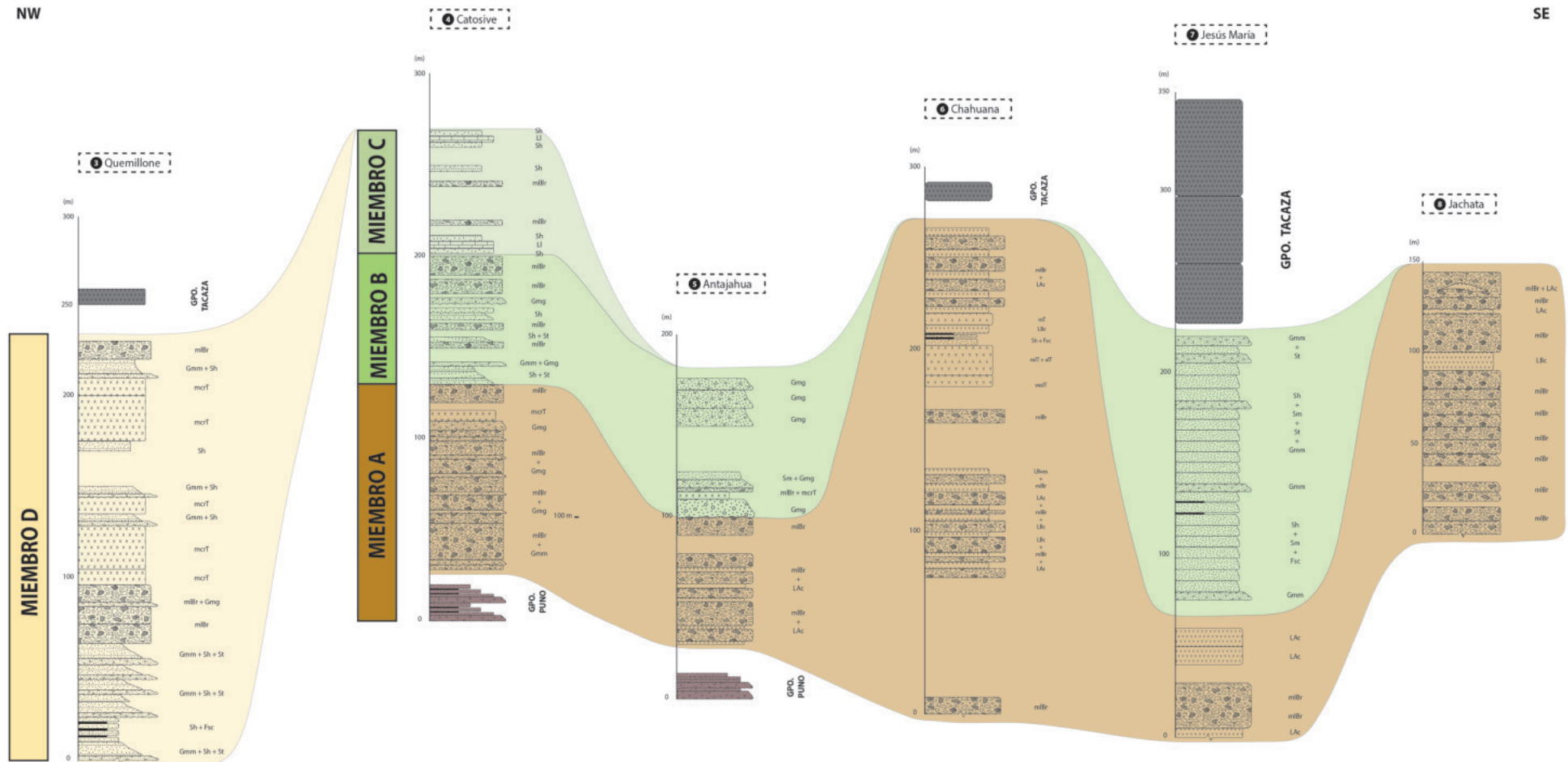


Figura 6.48: Correlación de las columnas Totorani y Llapapata en los alrededores de Lagunillas.

6.6 Distribución litoestratigráfica y cronoestratigrafía

El relleno Eoceno-Oligoceno está distribuido espacialmente en los tres sectores que fueron desarrollados anteriormente en esta sección (Sector Norte, Sector Centro y Sector Sur), es así que tomando en cuentas las correlaciones se puede realizar un mapa de distribución de los Miembros A, B, C y D de la Formación Pichu (Figura 6.49) y un cuadro cronoestratigráfico que resume la estratigrafía desde el Eoceno al Mioceno en los tres sectores (Figura 6.50).

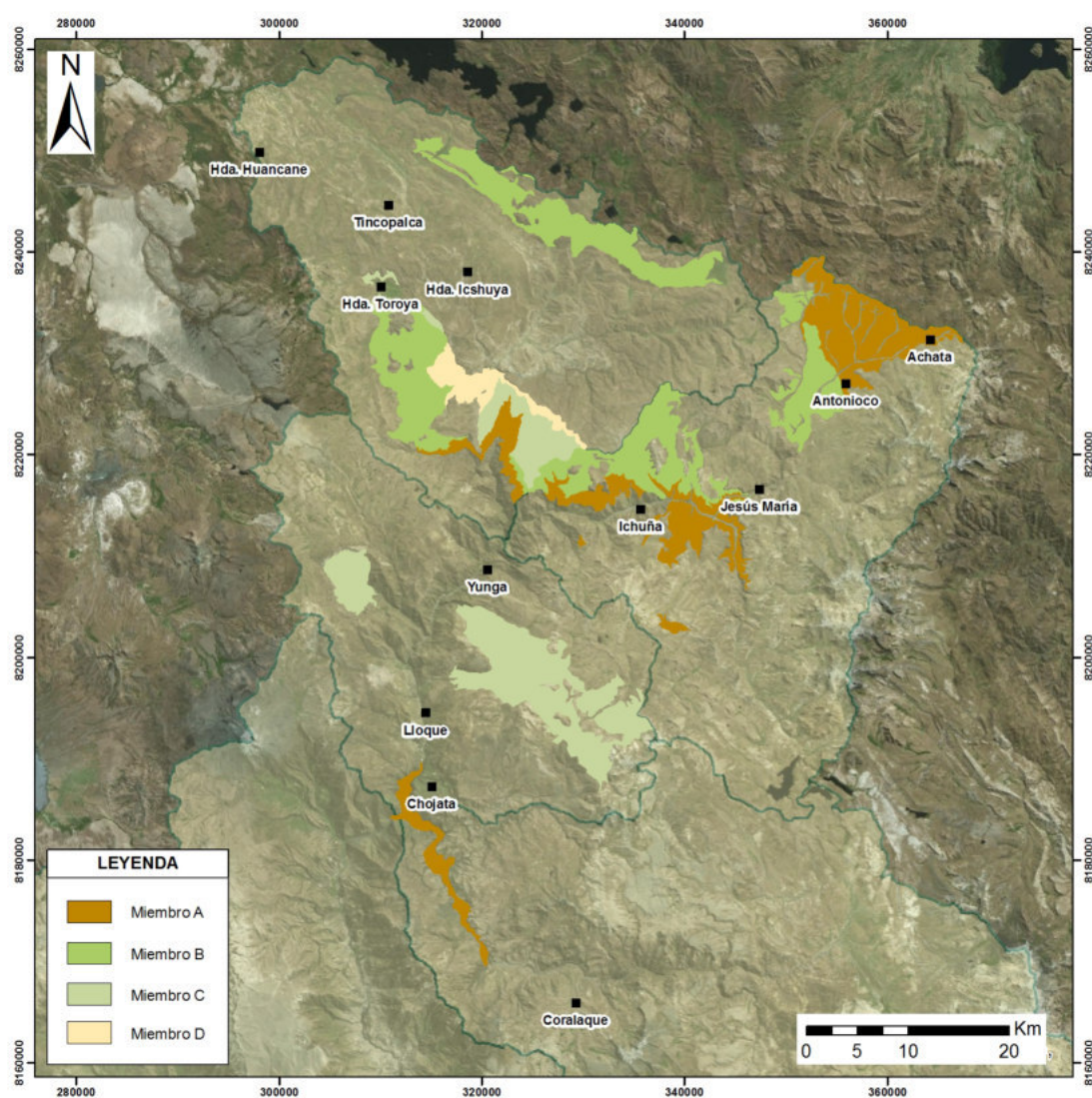


Figura 6.49: Mapa de las unidades A, B, C y D de la Formación Pichu.

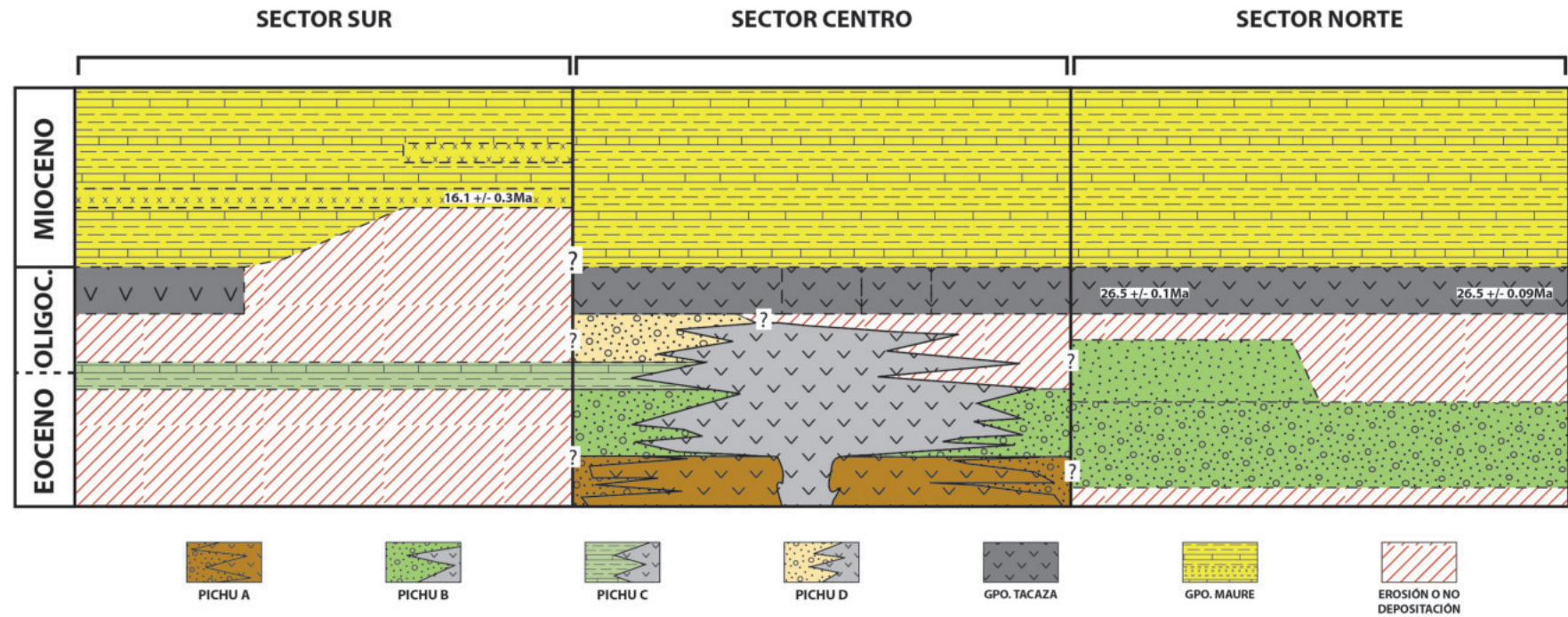


Figura 6.50: Cuadro Cronoestratigráfico tentativo de los depósitos del Eoceno-Mioceno de la zona de estudio, tomando en cuenta información estratigráfica y geocronológica (Bellon y Lefèvre (1976); Fornari et al. (2002); Rousse et al. (2005))

Capítulo 7

Análisis Litogeoquímico

Para realizar la caracterización litogeoquímica de las rocas de la Formación Pichu se recolectaron veinte muestras (Figura 7.1). Entre estas once muestras de rocas volcánicas efusivas, las cuales fueron contrastadas con nueve muestras del Gpo. Tacaza tipo, mediante diagramas de clasificación analítica de rocas volcánicas, diagramas bivariados y diagramas spider. Finalmente se analizaron nueve muestras de areniscas mediante gráficos de clasificación analítica, diagramas de proveniencia y diagramas spider.

Las muestras de lavas y areniscas pertenecen a los registros estratigráficos de Jachata, Jesús María, Chahuana, Ciguaya, Llapapata y Totorani.

Código de muestra	Lugar	Este (X UTM)	Norte (Y UTM)	Roca	Unidad Geológica
Act01-15-172	Quemillone	321364	8228832	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-046	Quemillone	321528	8228983	Lava basáltica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-140	Jesús María	346502	8215867	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-142	Jesús María	347837	8216646	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
Act01-15-153	Jesús María	347270	8216461	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
Act01-15-247	Jesús María	348235	8216900	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-024	C° Llapapata	324515	8243630	Lava andesita-basáltica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-053	Totorani	330081	8241172	Lava andesita-basáltica	Gpo. Tacaza
ACT01-15-196	Q° Vilavilani	357577	8229709	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-197	Q° Vilavilani	357563	8229147	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-248	Huancune	345942	8215606	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-248dup	Huancune	345942	8215606	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-262	Q° Chahuana	344361	8210474	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-263	Q° Chahuana	343870	8210044	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-15-266	Q° Chahuana	343455	8209698	Lava andesítica	Fm. Pichu
ACT01-16-138	Jesús María	346169	8215734	Lava andesítica	Fm. Pichu
GR13-12-119	Lagunillas	322077.95	8267646.12	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
GR13-12-120	Lagunillas	316160	8270253.9	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
GR13-12-121	Lagunillas	313276.77	8268791.84	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
GR26-13-031	Lagunillas	319496.77	8282231.68	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
GR26-13-031dup	Lagunillas	319496.77	8282231.68	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
GR26-13-152A	Lagunillas	332826.19	8263964.49	Lava andesítica	Gpo. Tacaza
LAG-15-1	Lagunillas	329785.4	8240814.94	Lava basáltica	Gpo. Tacaza
Lg-504	Lagunillas	317323.49	8272255.14	Lava traquiandesítica	Gpo. Tacaza
Oc-74	Lagunillas	320166.48	8278917.21	Lava traquiandesítica	Gpo. Tacaza
ACT01-16-022	C° Llapapata	324373	8244061	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-023	C° Llapapata	324373	8244061	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-048	Totorani	331833	8242668	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-049	Totorani	332148	8242495	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-160-49dup	Totorani	332148	8242495	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-139	Jesús María	346318	8215762	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-141	Jesús María	346709	8216030	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-144	Q° Ciguaya	307169	8207618	Arenisca	Fm. Pichu
ACT01-16-145	Q° Ciguaya	306126	8207535	Arenisca	Fm. Pichu

Figura 7.1: Datos de la muestras utilizadas en análisis litogeoquímico.

7.1 Litogeoquímica de las rocas Volcánicas

Se analizaron once muestras de rocas volcánicas lávicas de la Formación Pichu y rocas volcánicas lávicas Oligocénicas (Gpo. Tacaza); además se tomaron en cuenta las rocas del Gpo. Tacaza tipo del sector de Lagunillas (base de datos de INGEMMET, *Klinck et al.* (1986) y *Mamani et al.* (2010)) con el fin de contrastar su firma geoquímica con las rocas del Grupo Tacaza presente en los alrededores del área de estudio y las rocas volcánicas de la Formación Pichu.

Para la clasificación analítica de las rocas volcánicas se utilizó el diagrama Total Silice Alkalís (TAS) (Figura 7.2) propuesto por *Le Bas y Streckeisen* (1991). Las rocas volcánicas muestran una tendencia básica a intermedia y una distribución con un rango amplio de rocas que van desde basaltos, traqui-andesita-basáltica, traquiandesitas y andesitas; sin embargo, este diagrama no muestra campos definidos, esto posiblemente se deba a procesos de silicificación o la movilización del alcalis.

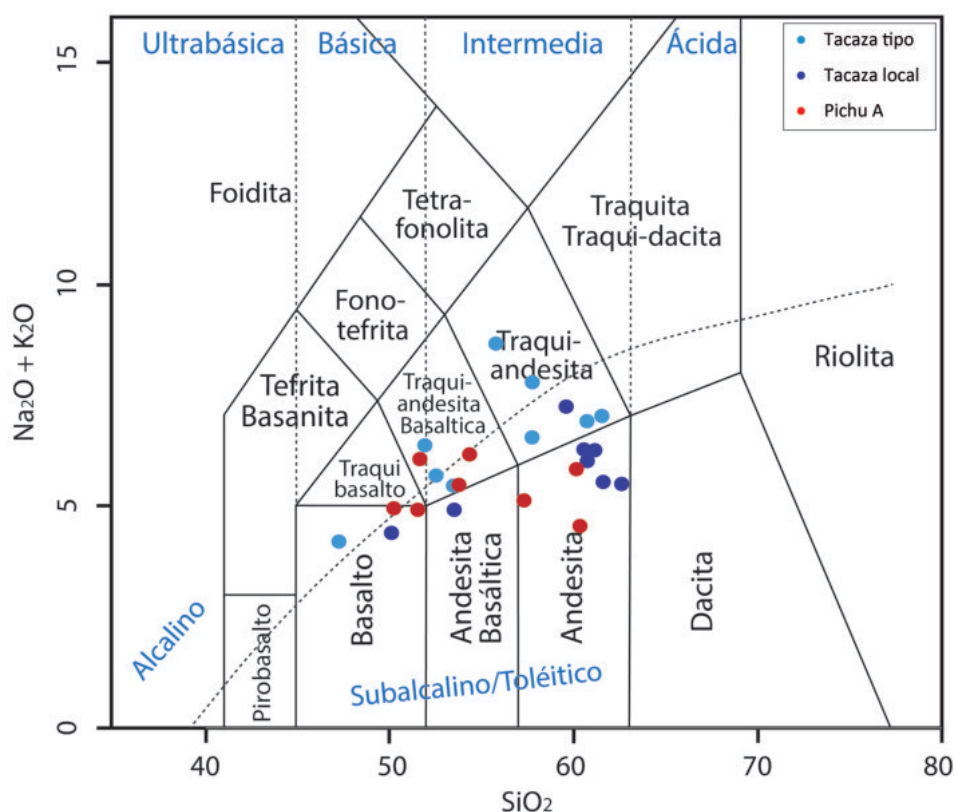


Figura 7.2: Diagrama de clasificación química de rocas volcánicas TAS según *Le Bas y Streckeisen* (1991).

Con la finalidad de establecer campos definidos que permitan caracterizar y diferenciar las rocas del Gpo. Tacaza y la Fm. Pichu, se utilizó una clasificación química tomando en cuenta los elementos inmóviles (Figura 7.3) propuesto por *Winchester y Floyd (1977)*; este gráfico muestra principalmente dos campos que representan las rocas del Gpo. Tacaza (Tipo y local) y la Fm. Pichu. El primer campo compuesto por andesitas, andesitas-basálticas y basaltos alcalinos, el segundo campo compuesto por basaltos alcalinos.

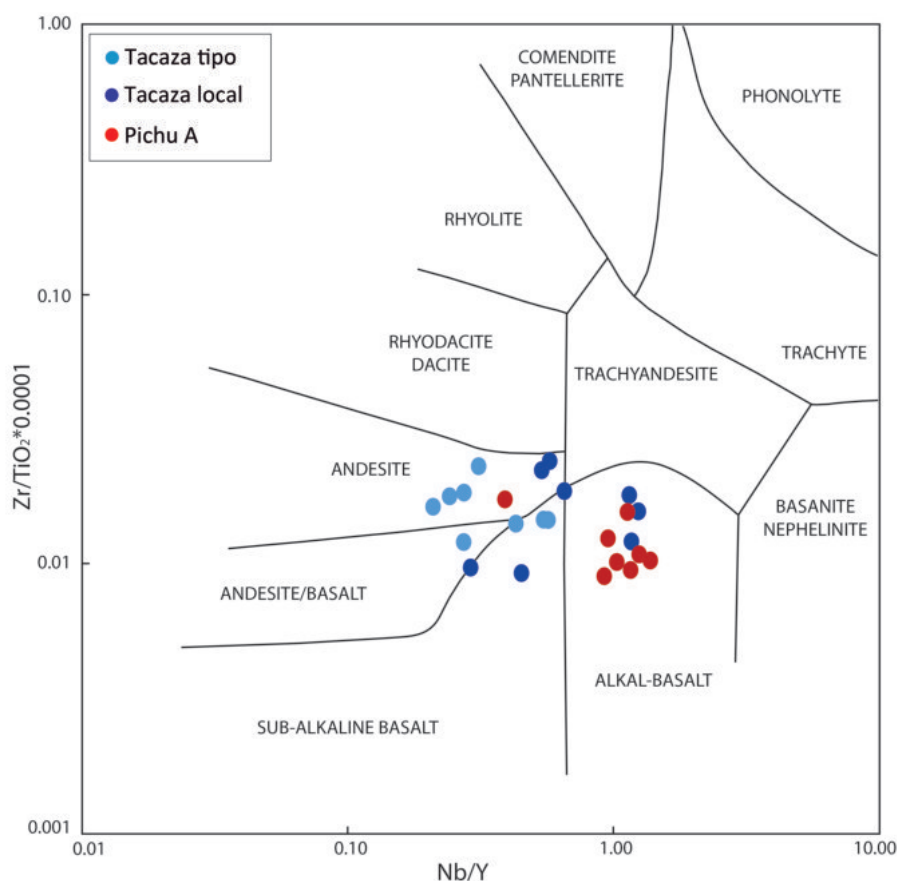


Figura 7.3: Diagrama de clasificación química de rocas volcánicas con elementos inmóviles según *Winchester y Floyd (1977)*.

Con respecto a las series magmáticas de las rocas volcánicas de ambas unidades, en la Figura 7.2 se observa que las muestras del Grupo Tacaza tipo tienen una tendencia hacia las serie Alcalina y Subalcalinas/Toléitica, las rocas del Gpo. Tacaza local muestran una tendencia hacia la serie Subalcalina/Toléitica y de igual manera las rocas de la Fm. Pichu.

Por otro lado en diagrama de series magmáticas propuesto por *MacLean y Barrett (1993)* (Figura 7.4) muestra que las rocas del Gpo. Tacaza (Tipo y local) muestran una tendencia hacia las series Calcoalcalica y Transicional, mientras que las rocas de la Fm. Pichu muestran una tendencia hacia las series Transicional y Toléitica. Los gráficos (Figuras 7.2 y 7.4) muestran resultados acordes entre sí.

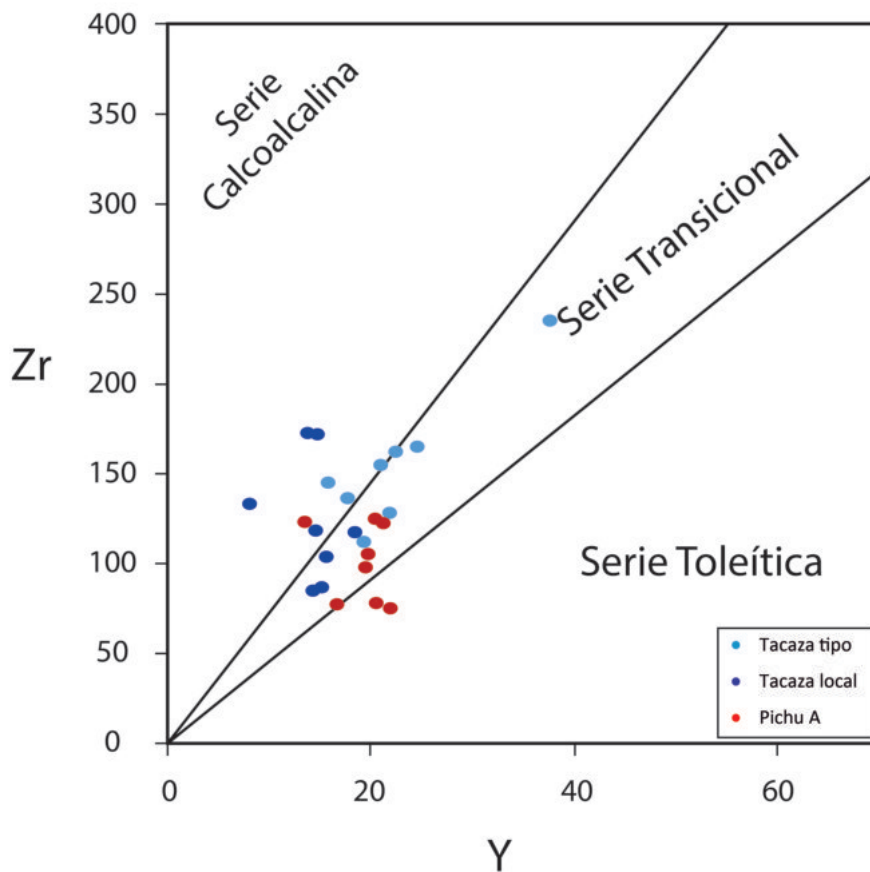


Figura 7.4: Diagrama de series magmáticas según MacLean y Barrett (1993).

Para evaluar los patrones de tierras raras se plotearon las razones de elementos trazas (Sr/Y , La/Yb , La/Sm , Sm/Yb y Dy/Yb) y sílice SiO_2 (Figura 7.5) para discriminar los vulcanismos del Eoceno (Fm. Pichu) y Oligoceno (Gpo. Tacaza).

Las relaciones Sr/Y , La/Yb y La/Sm son susceptibles al fraccionamiento de las plagioclasas, mientras las relaciones Sm/Yb y Dy/Yb son menos afectadas. Las relaciones Sm/Yb y Dy/Yb contrastan la cantidad y el momento de la participación cortical antes y durante el engrosamiento, ya que estos parámetros demuestran la presencia de anfíboles y granates, es así que muestran variaciones particularmente marcadas con el tiempo (Mamani *et al.*, 2010).

Se puede observar claramente que las relaciones Sr/Y , La/Yb , La/Sm , Sm/Yb y Dy/Yb se incrementan con el contenido de Sílice (SiO_2); tomando en cuenta esto se puede deducir que existe una diferenciación a través del tiempo evidenciada por dichas relaciones de elementos trazas. Las relaciones Sr/Y , La/Yb y La/Sm (Figuras 7.5A, 7.5B y 7.5C). Los gráficos Sm/Yb y Dy/Yb (Figuras 7.5D y 7.5E) muestran una ligera diferenciación a través del tiempo, lo que evidencia un cambio en el espesor cortical.

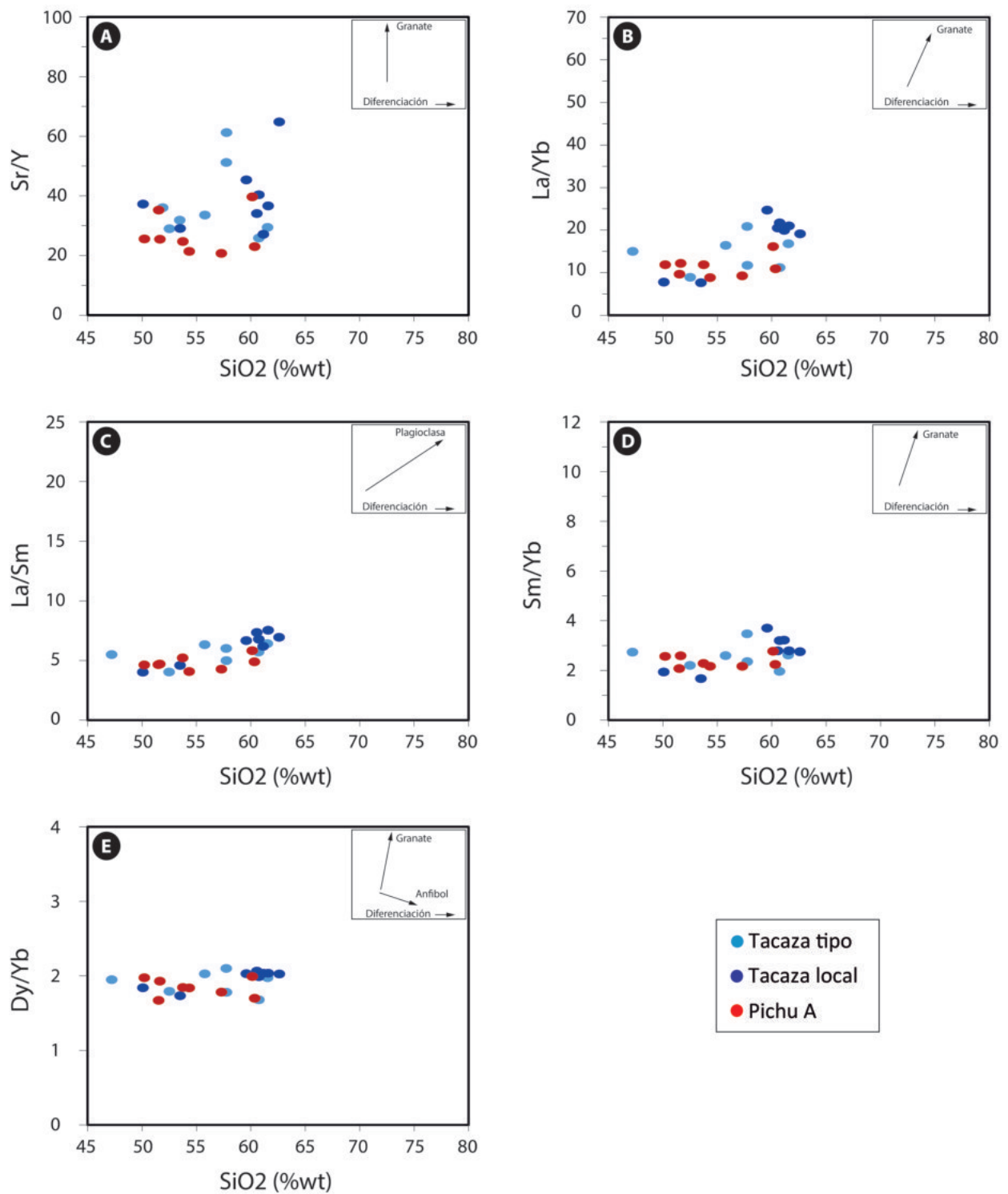


Figura 7.5: Diagramas de las relaciones Sr/Y (A), La/Yb (B), La/Sm (C), Sm/Yb (D) y Dy/Yb (E) versus SiO_2 (%peso). Los diagramas A, B, C, D y E muestran las rocas del Gpo. Tacaza (Tipo y local) y las rocas de la Fm. Pichu

La relación Ce/Y es un indicador del espesor de la corteza durante el vulcanismo, la relación Ce/Y aumenta con la profundidad (*Mantle y Collins, 2008*). La distribución de las muestras en el diagrama (Figura 7.6) sugieren que las rocas volcánicas de la Formación Pichu se emplazaron en cortezas de poco espesor (entre 20 y 30 Km), mientras que las rocas volcánicas del Grupo Tacaza se emplazaron a espesores mayores a 30 Km.

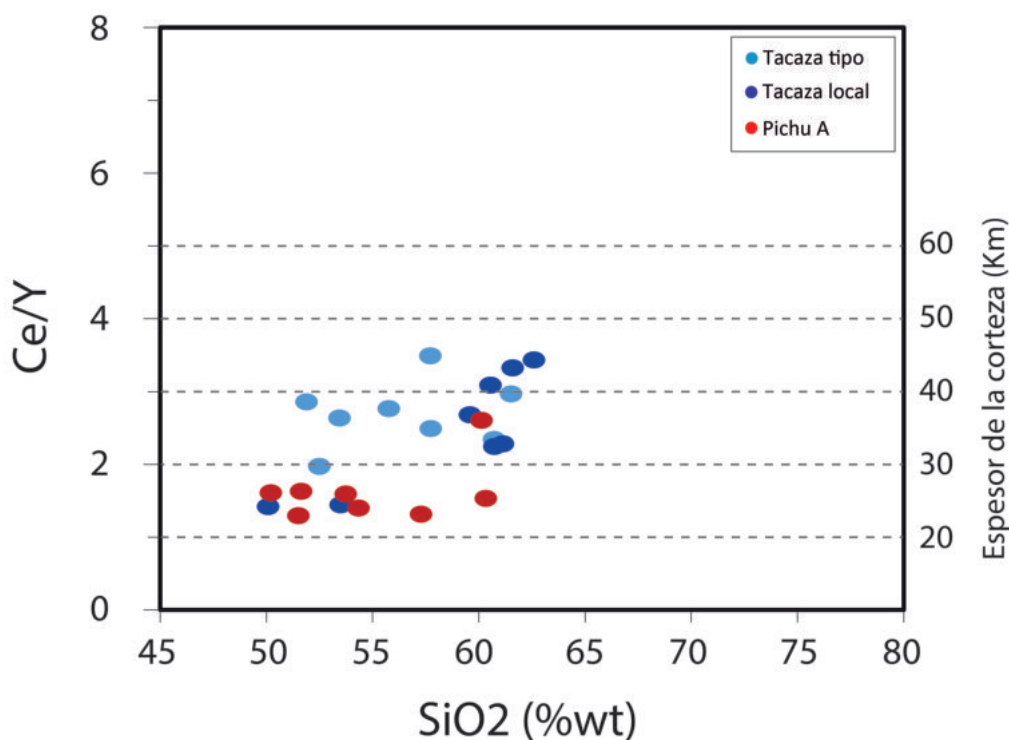


Figura 7.6: Relación Ce/Y versus SiO_2 , propuesta por *Mantle y Collins* (2008) para estimar la profundidad de la cámara magmática.

El diagrama spider (Figura 7.7) normalizado al Manto Primitivo según (*Sun y McDonough, 1989*), sugieren que las rocas volcánicas de la Formación Pichu presentan características geoquímicas distintas a las rocas del Grupo Tacaza.

Para las rocas del Grupo Tacaza el diagrama spider muestra un patrón de enriquecimiento en elementos LIL (large-ion lithophile) respecto a los elementos HFS (high field strength); así también el diagrama muestra un enriquecimiento de las tierras raras livianas (LREE) respecto a las tierras raras pesadas (HREE).

Para las rocas de la Formación Pichu el diagrama spider muestra un patrón de enriquecimiento en elementos LIL respecto a los elementos HFS (a excepción del Nb y Ta); así también el diagrama muestra un enriquecimiento de las tierras raras livianas respecto a las tierras raras pesadas.

Las rocas de la Formación Pichu en contraste con las rocas del Grupo Tacaza Tipo muestran un empobrecimiento de Rb, Th, Pr, Nd, Zr y en HREE, un enriquecimiento en Cs, Nb Y Ta (los dos últimos son elementos que muestran una anomalía negativa típica en zonas de subducción); por otro lado las rocas del Grupo Tacaza local muestran un empobrecimiento en Th, Pr, Nd, Sm y HREE, este empobrecimiento quizá se deba a la diferenciación magmática.

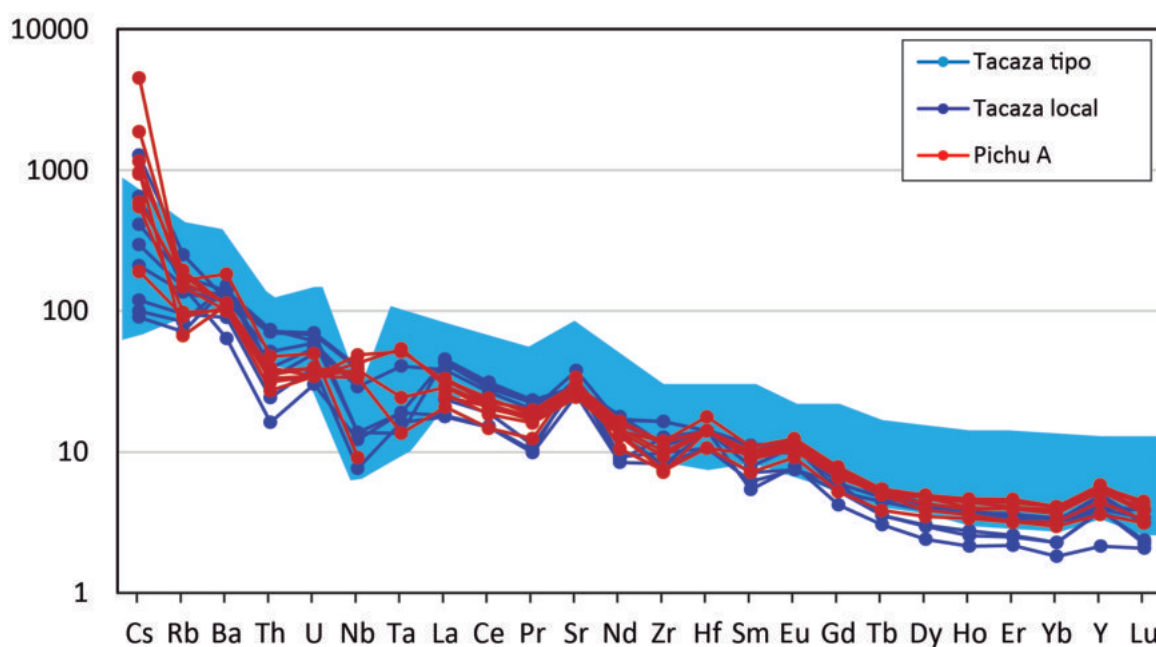


Figura 7.7: Diagrama SPIDER de elementos trazas y de REE normalizados a el manto primitivo de Sun y McDonough (1989).

Gorton y Schandl (2000) proponen una diagrama de clasificación tomando en cuenta elementos trazas (Th, Ta y Yb), los cuales se mantendrían inmóviles incluso bajo procesos de metamorfismo, para discriminar el régimen tectónico en el cual se forman las rocas volcánicas intermedias y ácidas. En la Figura 7.8 las relaciones Th/Ta para las rocas de la Formación Pichu presentan valores entre 0 y 5, valores típicos de Zonas volcánicas intraplaca; por otro lado, las relaciones Th/Ta de las rocas volcánicas del Grupo Tacaza (Tipo y local) presentan valores entre 0 y 15, estos valores indican Zonas volcánicas intraplaca y margen continental activo.

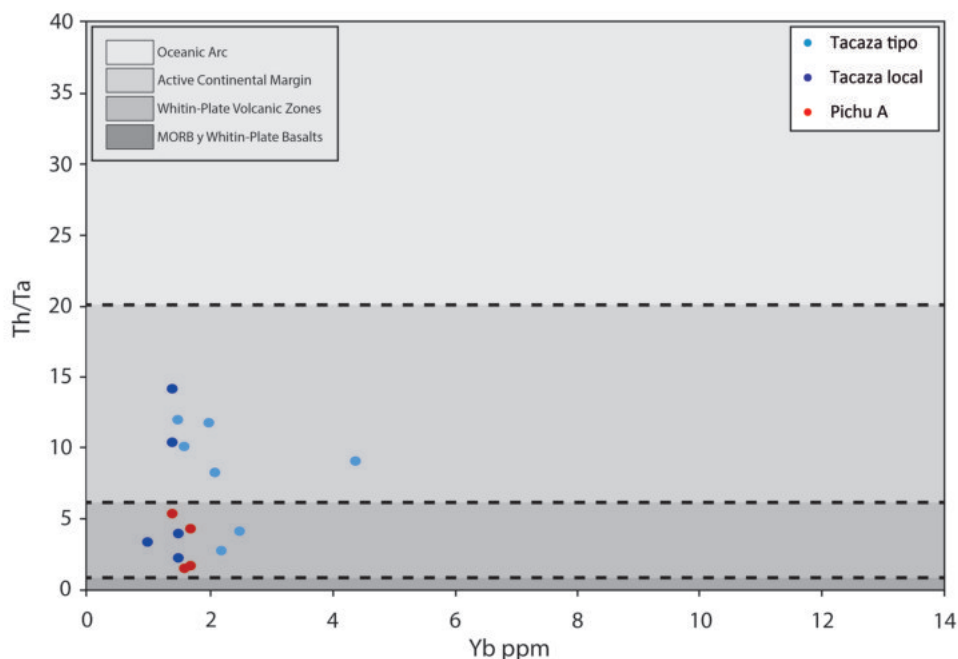


Figura 7.8: Diagrama de discriminación geotectónica de Gorton y Schandl (2000).

7.2 Litogeoquímica de las rocas Sedimentarias

Se analizaron nueve muestras de areniscas (Grauvacas?) del Miembro B de la Formación Pichu con el fin de determinar y caracterizar la firma geoquímica de las rocas de la Formación Pichu presente en el área de estudio. Es así que se presentan diagramas de clasificación química, de proveniencia sedimentaria y Spider.

Para la clasificación química de las areniscas se utilizó el diagrama propuesto por *Pettijohn et al.* (1972), este diagrama relaciona el logaritmo de SiO_2/Al_2O_3 versus el logaritmo de Na_2O/K_2O (Figura 7.9). El diagrama utiliza la primera relación (SiO_2/Al_2O_3) como un indicador de madurez mineralógica pues permite discriminar desde areniscas de composición silíceas (areniscas cuarzosas) hasta areniscas de composición aluminosa (Grauvacas); por otro lado, la segunda relación (Na_2O/K_2O) permite discriminar entre grauvacas ($Na_2O > K_2O$) y arcosas ($Na_2O < K_2O$).

La Figura 7.9 indica que las areniscas en su mayoría forman parte de la Grauvacas, a excepción de las muestras ACT01-16-141 y ACT01-16-144, las cuales se encuentran en el límite entre grauvacas y litoarenitas. Los valores de $Log(SiO_2/Al_2O_3)$ presentan valores menores a uno (1), y los valores de $Log(Na_2O/K_2O)$ en su mayoría presentan valores por encima de cero (0), excepto las muestras del sector de Jesús María (valores menores a 0); estos valores permiten indicar de manera general la baja madurez mineralógica y escasa proporción de feldespato potásico de las muestras.

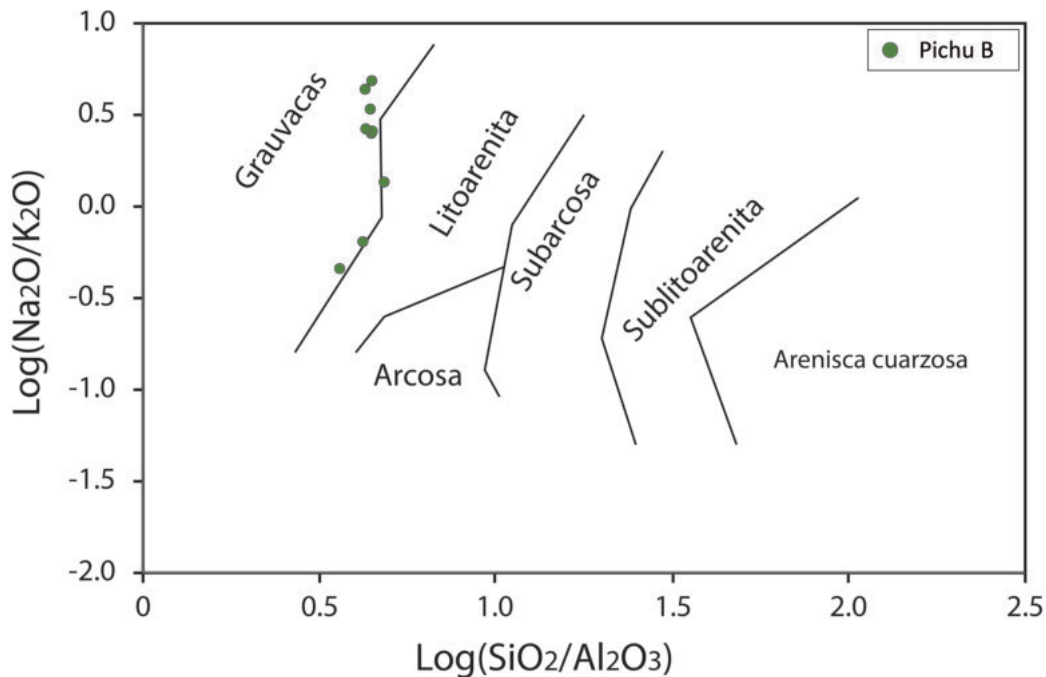


Figura 7.9: Clasificación de arenisca según *Pettijohn et al.* (1972).

Otro diagrama de clasificación química de areniscas y pelitas es el propuesto por *Herron* (1988), en este diagrama relaciona el logaritmo de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ versus el logaritmo de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (Figura 7.10), y un tercer parámetro, el cual no se muestra en el gráfico, que permite clasificar a las areniscas según el contenido de CaO en areniscas no calcáreas ($\text{CaO} < 4\%$), areniscas calcáreas ($\text{CaO} = 4-15\%$) y areniscas carbonáticas ($\text{CaO} > 15\%$). La primera relación ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) es un indicador de madurez mineralógica, además de ser un término textural (distingue entre areniscas y pelitas), y la segunda relación ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$) permite discriminar areniscas feldespáticas, areniscas líticas y areniscas con contenido férrico, de esta manera puede considerarse como un indicador de estabilidad mineralógica.

La Figura 7.10 indica que la mayoría de las muestras se distribuyen entre los campos de las pelitas y grauvacas (muestras ACT01-16-141 y ACT01-16-144). Los valores de $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ presentan valores menores a uno (1) indicando una baja madurez mineralógica debido a la presencia de matriz en la roca, por otro lado los valores de $\text{Log}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ en su mayoría presentan valores por encima de cero (0) lo que indica que no pose valores elevados de hierro (los minerales inestables no están presentes en la roca). Tomando en cuenta el tercer parámetro las areniscas del sector de Totorani (muestras ACT01-16-149 y ACT01-16-149dup) y las areniscas de la Qda. Ciguaya (muestra ACT01-16-144), mientras que las demás muestras pertenecen al grupo de las areniscas calcáreas.

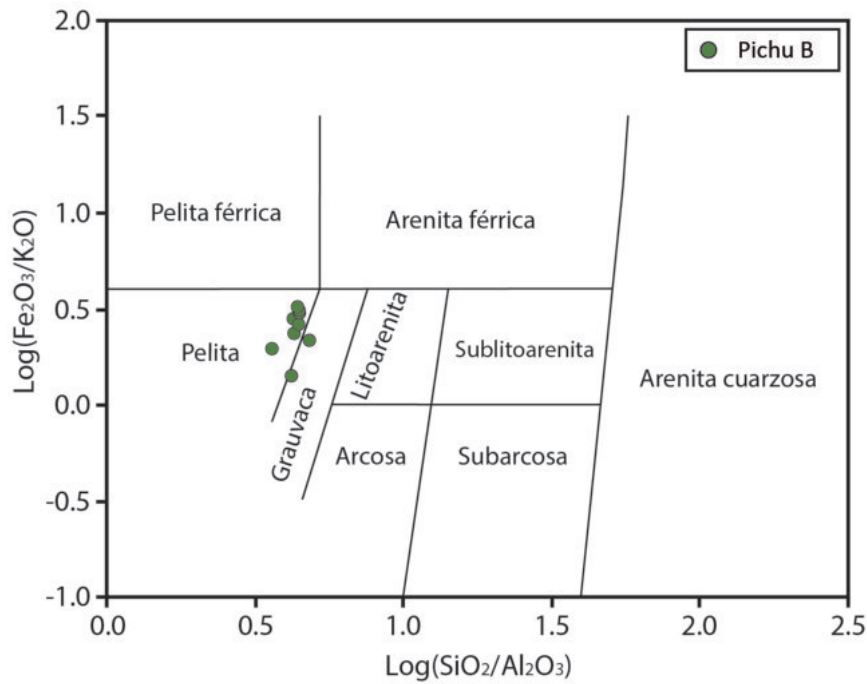


Figura 7.10: Clasificación de arenisca según Herron (1988).

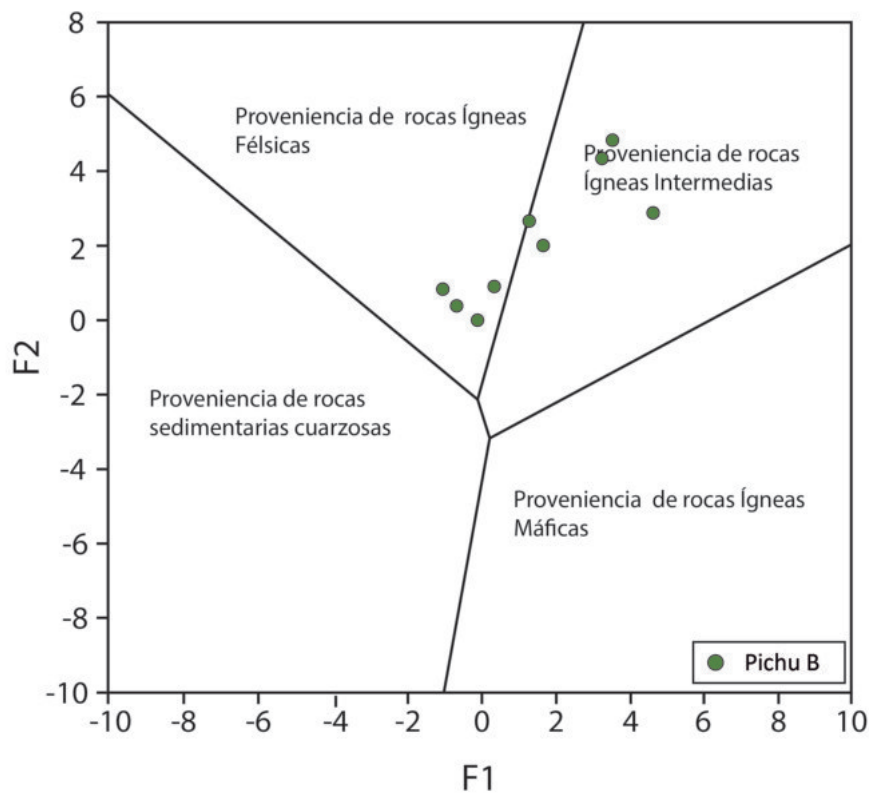


Figura 7.11: Diagrama de funciones discriminantes para proveniencia de areniscas usando elementos mayores según Roser y Korsch (1988). Las funciones discriminantes son:

$$F1 = (-1,773.TiO_2) + (0,607.Al_2O_3) + (0,760.Fe_2O_3) + (-1,500.MgO) + (0,616.CaO) + (0,509.Na_2O) + (-1,224.K_2O) + (-9,090);$$

$$F2 = (0,445.TiO_2) + (0,070.Al_2O_3) + (-0,250.Fe_2O_3) + (-1,142.MgO) + (0,438.CaO) + (1,475.Na_2O) + (-1,426.K_2O) + (-6,861)$$

Roser y Korsch (1988) proponen un diagrama de funciones discriminantes para proveniencia de sedimentos terrigenos (Figura 7.11), este gráfico comprende cuatro grupos de proveniencia (rocas ígneas félsicas, rocas ígneas intermedias, rocas ígneas máficas y rocas sedimentarias cuarzosas). Las muestras de la Formación Pichu corresponden a rocas parentales ígneas de composición félsicas a intermedias. Este diagrama permite interpretar, para las areniscas de la Formación Pichu, que el aporte para las areniscas fue desde un arco magmático activo.

El diagrama spider (Figura 7.12) normalizado a la corteza superior según Taylor y McLennan (1985) y Rudnick y Fountain (1995), sugieren que las areniscas de la Formación Pichu muestran un patrón de enriquecimiento en elementos LIL (large-ion lithophile) respecto a los elementos HFS (high field strength), el diagrama también muestra un ligero empobrecimiento de las tierras raras livianas (LREE) respecto a las tierras raras pesadas (HREE) y los metales pesados (Pb, Sc, V, Co y Cu); a su vez se observan anomalías positivas de Li y anomalías negativas de Cr, Ni y Zn. Caso especial son las areniscas de la Columna ciguaya (muestras ACT01-16-144 y ACT01-16-145), pues muestran valores de metales pesados (Pb, Cu y Zn) por encima de lo normal; mientras que las areniscas de la Columna Totorani (ACT01-16-048 y ACT01-16-049dup) muestran valores de Cs muy debajo del promedio.

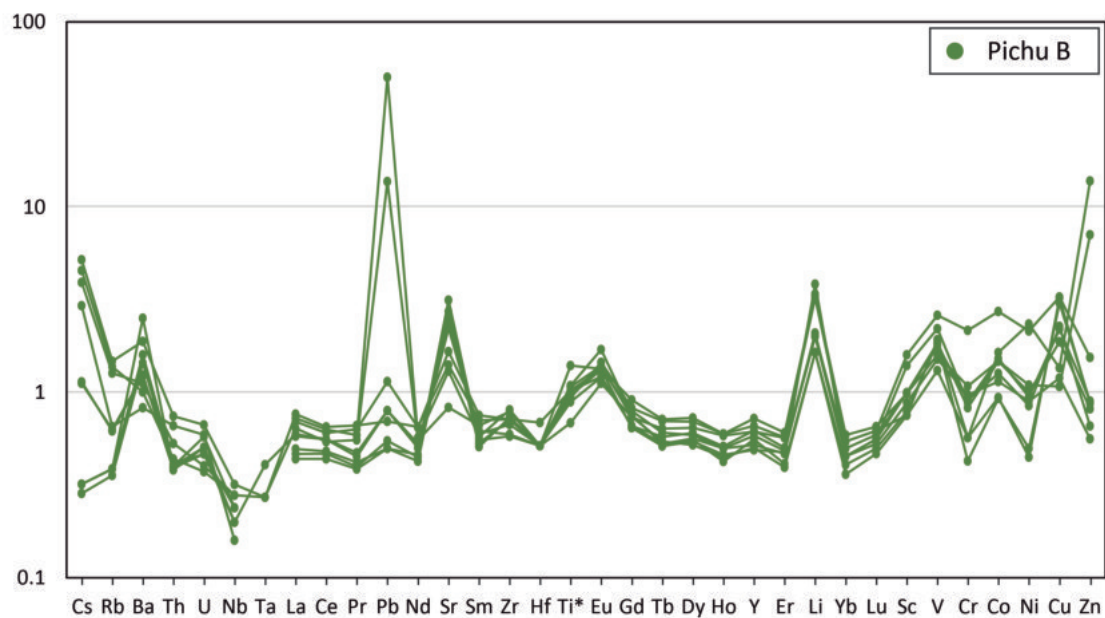


Figura 7.12: Diagrama spider de las areniscas de la Formación Pichu normalizadas a la corteza superior según Taylor y McLennan (1985) y Rudnick y Fountain (1995).

Capítulo 8

Discusión de los resultados

La distribución y configuración de los depósitos del Eoceno-Oligoceno inferior (Formación Pichu) en el borde oriental de la Cordillera Occidental revelan que los depósitos se produjeron en dos cuencas sedimentarias coetáneas pero de diferente comportamiento funcionales desde el Eoceno al Mioceno separadas por un alto topográfico ubicado en Ichuña (*Rodríguez et al.*, 2002). La evolución en ambas cuencas se evidencia por la heterogeneidad de las facies debida a controles estructurales, la proximidad y distalidad al centro volcánico (ubicado en los alrededores del sector Centro); sin embargo, a pesar de dicha heterogeneidad la evolución del Eoceno-Oligoceno inferior se muestra como un lapso de tiempo claramente definido pues se encuentran suprayaciendo de manera discordante a unidades del Jurásico-Cretácico y Paleoceno (Gpo. Yura, Fm. Murco, Fm. Ayabacas y Gpo. Puno), las cuales se encuentran deformadas en última instancia por el evento tectónico Inca (F1) propuesto por *Sébrier et al.* (1988) y es durante este mismo evento tectónico que se habrían depositado las facies de la Formación Pichu. A su vez se encuentra sellado por el vulcanismo del Oligoceno (Gpo. Tacaza), que muestra características sedimentológicas y geoquímicas claramente distintas a las facies volcánicas de la Formación Pichu.

Finalmente, las características y distribución de las rocas volcánicas permiten establecer que las facies volcánicas de la Formación Pichu serían producto de la emisión a partir de un centro volcánico en los alrededores del Sector Centro; sin embargo, a pesar que las facies sedimentarias se encuentran constituidas por material volcánico es complejo estimar de donde proceden, es decir, si son el producto del retrabajo de material volcánico preexistente (sedimentos post-eruptivos) o material transportado y depositado durante una actividad volcánica (sedimentos sin-eruptivos).

Capítulo 9

Conclusiones y recomendaciones

9.1 Conclusiones

- La Formación Pichu en el sector norte comprenden facies aluvio-fluviales con un amplio desarrollo, estas corresponden al Miembro B y estarían asociadas a la caída de detritos a partir de un relieve positivo, el cual sería consecuencia de un acortamiento tectónico en el sector Mañazo-Lagunillas producido desde el Paleoceno al Mioceno estudiado por *Jaillard y Santander* (1992).
- Las muestras de areniscas muestran valores representativos de grauvacas e indican que posiblemente provienen de una fuente de rocas ígneas intermedias a félsicas.
- Las areniscas de la Formación Pichu están constituidas por material de origen volcánico; a su vez las características geoquímicas de las areniscas muestran características de grauvacas y una proveniencia de rocas ígneas intermedias a félsicas; estas evidencias refuerzan la idea de una actividad volcánica coetánea a la sedimentación o el retrabajo de rocas volcánica preexistentes.
- Las características geoquímicas de la Formación Pichu muestran patrones definidos lo cual permite establecer una diferencia con el vulcanismo del Grupo Tacaza producido durante el Oligoceno.
- En base a la posición estratigráfica y reforzado por las características geoquímicas distintivas de la Formación Pichu, se puede determinar que la Formación Pichu corresponde a la deposición de facies previas al vulcanismo Oligoceno del Grupo Tacaza y posteriores a las facies continentales Eocénicas del Grupo Puno; es decir corresponde al intervalo entre el Eoceno superior y Oligoceno inferior.
- Finalmente, La Formación Pichu presenta cuatro miembros; el Miembro A con un dominio de facies volcánicas efusivas y explosivas; el Miembro B compuesto por facies aluvio-fluviales y con interdigitaciones volcánicas en el sector centro; el Miembro C compuesto por facies

fluviales y lacustrinas con interdigitaciones de facies volcánicas; y el Miembro D con interdigitaciones de facies aluvio-fluviales y facies volcánicas.

9.2 Recomendaciones

- Tras finalizar este trabajo, se recomienda realizar estudios petrográficos a las areniscas volcánicas de la Formación Pichu, porque permitirá establecer características de las facies sedimentarias, así también permitirá establecer una relación de la sedimentación y la actividad volcánica durante el Eoceno y Oligoceno.
- También se recomienda realizar un estudio geoquímico de las facies sedimentarias de los Miembros C y D, con el fin de estimar patrones característicos de estos miembros y así complementar a este trabajo.
- Finalmente, se recomienda realizar un estudio estructural en la zona de estudio, porque permitirá establecer la geometría de la cuenca, así como la dinámica de esta; todo esto permitirá comprender de manera adecuada la evolución sedimentológica y estructural de esta cuenca.

Referencias bibliográficas

- Acosta, J., Quispe, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Paico, D., y Santisteban, A. (2014). Mapa Metalogénico del Perú. *INGEMMET*.
- Bellon, H. y Lefèvre, C. (1976). Données géochronométriques sur le volcanisme andin dans le sud du pérou. implications volcano-tectoniques. *CR Acad. Sci. Paris*, 283:1–4.
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de arequipa. *Boletín de la Sociedad geológica del Perú*, 38:5–63.
- Branney, M. y Kokelaar, B. (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. 27:51–86.
- Cabrera, A. y Petersen, G. (1936). *Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno*. Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú, Boletín 115, 112 p.
- Callot, P. (2008). *La formation Ayabacas (limite Turonien-Coniacien, Sud-Pérou): collapse sous-marin en réponse à l'amorce de l'orogénèse andine*. Tesis doctoral, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 255 pp.
- Carlotto, V. (2013). Paleogeographic and tectonic controls on the evolution of cenozoic basins in the altiplano and western cordillera of southern peru. *Tectonophysics*, 589:195–219.
- Carlotto, V., Carlier, G., Jaillard, E., Cardenas, J., Cerpa, L., Flores, T., y Latorre, O. (2005). Las cuencas terciarias sinorogénicas en el altiplano y en la cordillera occidental. *Boletín de la Sociedad geologica del Perú*, 6(spécial):103–126.
- Carlotto, V., Carlier, G., Jaillard, E., Cardenas, J., Fornari, M., y Cerpa, L. (2002). Paleogeographic control on the evolution of tertiary basins in the western cordillera and altiplano of southern peru (condorama-cusco-ayaviri). En *International Symposium on Andean Geodynamics, Tolouse, Francia, Géodynamique andine: résumés étendus*, volumen 5, pp. 117–120.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-Martínez, E., Navarro, P., y Jaimes, F. (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, 103:1–89.
- Carrasco, S. (2002). *Características petrográficas y geoquímicas del Grupo Barroso en los cuadrantes III y IV del cuadrángulo de Ichuña (33-u)*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 108 p.
- Carroll, A. y Bohacs, K. (1999). Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls. *Geology*, 27(2):99–102.
- Cereceda, C., Chapilliquén, J., y Maquera, V. (2015). *Estudio Litogeoquímico de la subcuenca del Río Ichuña - cuenca del Río Tambo*. *INGEMMET*, 152 p.
- Cerpa, L. y Meza, P. (2001). *Las cuencas neogenas del sur del Perú: La cuenca Descanso-Yauri (Mioceno). Evolución sedimentológica y tectónica*. Tesis de grado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 130 p.
- Collinson, J. (1996). Alluvial sediments. In: Reading, H., eds. *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. London: Department of Earth Sciences, University of Oxford, pp. 37–82.

- Cruz, E. (1976). *Geología evaluación preliminar de las calizas - sector Curire - Chaclacaya*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 117 p.
- Cuellar, F. (2001). *Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de las Series Meso-Cenozoicas del cuadrángulo de Pichacani (Hoja 33-v) Cuadrante II (SE), Sur del Perú*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 92 p.
- D'Elía, L. (2010). *Caracterización estratigráfica y estructural de la evolución temprana (sin-rift y post-rift inicial) del margen sur de la Cuenca Neuquina entre Sañicó (Neuquén) y el río Limay (Río Negro)*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, 235 pp.
- Dávila, M. (1988). *Geología del cuadrángulo de Cailloma: Hoja 31s, Boletín 40 A*. INGEMMET.
- Ellison, R., Klinck, B., y Hawkins, M. (1989). Deformation events in the andean orogenic cycle in the altiplano and western cordillera, southern peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 2(3):263–276.
- Flores, T. y Rodriguez, R. (1999). *Las Cuencas Neógenas del Sur del Perú. La Cuenca Tinajani. Evolución Sedimentológica, Estratigrafía, Paleogeografía y Tectónica (Ayaviri, Puno)*. Tesis de grado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 114 p.
- Fornari, M., Baldellon, E., Espinoza, F., Ibarra, I., Jimenez, N., y Mamani, M. (2002). Ar-Ar dating of late oligocene-early miocene volcanism in the altiplano. En *Geodinámica andina : Résumés étendus*, pp. 223–226.
- Francis, P. y Oppenheimer, C. (2003). *Volcanoes*. Oxford.
- García, W. (1978). *Geología de los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz y Pizacoma. Serie A, Boletín 29*. INGEMMET, 63 p.
- Gerth, H. (1915). Geologische und morphologische beobachtungen in den kordilleren südperús. *Geologische Rundschau*, 6(3):129–153.
- Gorton, M. P. y Schandl, E. S. (2000). From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian Mineralogist*, 38(5):1065–1073.
- Guevara, C. (1969). *Geología del cuadrángulo de Characato. Serie A, Boletín 23*. INGEMMET, 53 p.
- Harvey, A. (1997). The role of alluvial fans in arid zone fluvial systems. *Arid Zone Geomorphology: Processes, Form and Change in Drylands*, pp. 231–259.
- Herron, M. M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5):820–829.
- Heward, A. (1977). Alluvial fan sequence and megasequence models: with examples from westphalian d—stephanian b coalfields, northern spain. *CSPG Special Publications*, pp. 669–702.
- Jaillard, E. y Santander, G. (1992). La tectónica polifásica en escamas de la zona de mañazo-lagunillas (puno, sur del Perú). *Instituto Francés de Estudio Andinos, Bulletin*, 21(1):37–58.
- Jenks, W. (1948). *Geología de la hoja de Arequipa, Al 2000, 000. Boletín 9*. Instituto Geológico del Perú, 204 p.
- Klinck, B., Ellison, R., y Hawkins, M. (1986). The geology of the cordillera occidental and altiplano west of lake titicaca, southern peru. *British Geological Survey and Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú*, 340.
- Lau, M. (2009). Importancia geoquímica de las tierras raras en la edad de los materiales. *Geología - Revista del Capítulo de Ingeniería Geológica - CD Lima, Año IV N° 6*:34–38.
- Le Bas, M. y Streckeisen, A. L. (1991). The iugs systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 148(5):825–833.
- León, I. (1981). *Antecedentes sedimentológicos del Jurásico Cretácico Inferior en la Zona de Yura*. Tesis de bachiller, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 84 p.

- Lipa, V., Valdivia, W., y Carrasco, S. (2001). Memoria explicativa de la revisió geológica del cuadrángulo de ichuña (33-u), escala 1:50 000. *INGEMMET, Memoria Explicativa*, 12 p.
- MacLean, W. y Barrett, T. (1993). Lithogeochemical techniques using immobile elements. *Journal of geochemical exploration*, 48(2):109–133.
- Mamani, M., Wörner, G., y Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the central andean orocline (13 s to 18 s): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1-2):162–182.
- Mantle, G. y Collins, W. (2008). Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and mocho depth. *Geology*, 36(1):87–90.
- Marocco, R. y Del Pino, M. (1966). *Geología del Cuadrángulo de Ichuña 33-u*. INGEMMET, Serie A, Boletín 14, 57 p.
- Martínez, W. y Cervantes, J. (2003). *Rocas ígneas en el sur del Perú: nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18° 30' Latitud Sur*, volumen 26. INGEMMET, Serie D, Boletín 26, 140 p.
- McGowen, J. y Groat, C. (1971). *Van Horn Sandstone, West Texas: an alluvial fan model for mineral exploration*. Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, Report of investigations 72, 57 p.
- McPhie, J. (1993). *Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Hobart:University of Tasmania, Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, 196 p.
- Medina, V. (1998). *Estudio geológico - Geotécnico para la construcción de un reservorio con capacidad de 500 m3*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 147 p.
- Mendívil, S. (1965). Geología de los cuadrángulos de maure y antajave (hojas 35-x, 35-y)-[boletín a 10].
- Miall, A. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*, 13(1):1–62.
- Miall, A. (1992). Alluvial deposits. In: Walker, R. and James, N., eds. *Facies Models; Response to level sea change*. Canada: Geological Association of Canada, pp. 119–142.
- Newell, N. (1949). Geology of the lake titicaca region, peru and bolivia. *Geological Society of America Memoirs*, 36:1–124.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley and Sons, 432 p.
- Palacios, O., De La Cruz, J., De La Cruz, N., Klinck, B., Allison, R., y Hawkins, M. (1993). *Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca–Sur del Perú*. INGEMMET, Serie A, Boletín 42, 257 p.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., y Siever, R. (1972). *Sand and sandstone*. Springer Science & Business Media, 631 p.
- Portugal, J. (1974). Mesozoic and cenozoic stratigraphy and tectonic events of puno-santa lucia area, department of puno, peru. *AAPG Bulletin*, 58(6):982–999.
- Quispesivana, L. y Zapata, A. (2000). *Memoria descriptiva de la geología del cuadrángulo de Omate (34-u)*. INGEMMET, memoria descriptiva, 23 p.
- Reading, H. y Levell, B. (1996). Controls on the sedimentary rock record. In: Reading, H., eds. *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. London: Department of Earth Sciences, University of Oxford, pp. 5–36.
- Remigio, J. (2012). *Domos, diatremas y piroclastos del Complejo Volcánico Chucapaca, evidencias de Sistemas Epitermales, Moquegua–Perú*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 156 p.
- Rodríguez, R., Cuellar, F., Loza, M., Palomino, F., y Valdivia, E. (2002). Descripciones del relleno oligoceno-mioceno entre las cuencas tincopalca y huacochullo, borde oriental de la cordillera occidental entre los departamentos de puno y arequipa. En *Congreso Peruano de Geología*, volumen 11, pp. 265–272.
- Rodríguez, R., Sánchez, E., Choquehuanca, S., Fabián, C., y Del Castillo, B. (2014). Revisión estratigráfica del grupo puno (eoceno) en el límite del altiplano y la cordillera occidental (acora-puno-mañazo). división de cuencas sedimentarias. En *Congreso Peruano de Geología*, volumen 17, pp. 1–4.

- Rollinson, H. (1993). Using stable isotope data. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation: Geochemistry Series, Longman Scientific and Technical co-published with Wiley and Sons, New York*, pp. 266–315.
- Roser, B. y Korsch, R. (1988). Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical geology*, 67(1-2):119–139.
- Rousse, S., Gilder, S., Fornari, M., y Sempere, T. (2005). Spatial and temporal constraints on Neogene tectonics of the Peruvian Altiplano from new paleomagnetic and geochronologic data. *International Symposium on Andean Geodynamics, Universitat de Barcelona*, Extended abstracts(6):627–629.
- Rudnick, R. L. y Fountain, D. M. (1995). Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of geophysics*, 33(3):267–309.
- Salas, A. (1984). *Reconocimiento geológico del área sur oeste de la laguna Lagunillas - Puno*. Tesis de bachiller, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 62 p.
- Sánchez, A. y Zapata, A. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Sicuani (29-t), Nuñoa (29-u), Macusani (29-v), Limbani (29-x), Sandia (29-y), San Ignacio (29-z), Yauri (30-t), Azángaro (30-v), Putina (30-x), La Rinconada (30-y), Condoroma (31-t), Ocuvi (31-u), Juliaca (31-v), Callalli (32-t), y Ácora (32-x)*. INGEMMET, Memoria descriptiva, 52 p.
- Schmincke, H.-U. (2004). *Volcanism*. Springer Science, 333 p.
- Sébrier, M., Lavenue, A., Fornari, M., y Soulas, J. (1988). Tectonics and uplift in central andes (peru, bolivia and northern chile) from eocene to present. *Géodynamique*, 3(1-2):85–106.
- Selley, R. (2000). *Applied sedimentology*. Academic Press, San Diego (CA), London (UK), Burlington (MA), p. 523.
- Sun, S.-S. y McDonough, W.-s. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1):313–345.
- Talbot, M. y Allen, P. (1996). Lakes. In: Reading, H., eds. *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. London: Department of Earth Sciences, University of Oxford, pp. 83–124.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. M. (1985). The continental crust: its composition and evolution. pp. 9–17.
- Torres, D. (2011). *Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de la Cuenca Condoroma (Mioceno), Arequipa, Sur del Perú*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 176 p.
- Valdivia, E. y Rodríguez, R. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Lagunillas (32-u), Escala 1:100 000*. INGEMMET, Memoria descriptiva, 30 p.
- Valencia, M. y Rosell, W. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Puno (32-v), Escala 1:50 000*. INGEMMET, Memoria descriptiva, 31 p.
- Wasteneys, H. (1991). *Epithermal silver mineralization associated with a mid-Tertiary diatreme: Santa Barbara, Santa Lucia district, Puno, Peru*. Tesis doctoral, Queen's University, Kingston, Ontario, 367 p.
- Winchester, J. y Floyd, P. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology*, 20:325–343.